



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SENTETİK HİBRİT LİFLERLE GÜÇLENDİRİLEN SİLİNDİRLE
SIKIŞTIRILAN BETON YOL KAPLAMANIN PERFORMANS
ÖZELLİKLERİ

ABDULBASİT ALMOAMAR

DANIŞMAN

PROF. DR. ALTAN ÇETİN

BARTIN-2024



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SENTETİK HİBRİT LİFLERLE GÜÇLENDİRİLEN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILAN
BETON YOL KAPLAMANIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulbasit ALMOAMAR

BARTIN-2024

KABUL VE ONAY

Abdulbasit ALMOAMAR tarafından hazırlanan “SENTETİK HİBRİT LİFLERLE GÜÇLENDİRİLEN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILAN BETON YOL KAPLAMANIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ” başlıklı bu çalışma, 28.08.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitimi Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Altan ÇETİN danışmanlığında hazırlamış olduğum “SENTETİK HİBRİT LİFLERLE GÜÇLENDİRİLEN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILAN BETON YOL KAPLAMANIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

28.08.2024

Abdulbasit ALMOAMAR

ÖN SÖZ

Bu çalışma, Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Gerçekleştirilen tüm çalışmalarda bilgi ve tecrübesini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Altan ÇETİN'e, deneysel çalışmaların gerçekleşmesi için laboratuvar olanakları sağlayan İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığına teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmaları sürecinde, verdikleri destek ve gösterdikleri sabır için aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

.

Abdulbasit ALMOAMAR



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SENTETİK HİBRİT LİFLERLE GÜÇLENDİRİLEN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILAN BETON YOL KAPLAMANIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ

Abdulbasit ALMOAMAR

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Altan ÇETİN

Bartın-2024, sayfa: 77

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) yol kaplamaları, ekonomiklik, mekanik performans, üretim ve yapım avantajları ile bitümlü sıcak karışımlara alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. SSB kaplamalarda, maruz kaldığı ağır trafik yükleri ve çevresel etkilere bağlı olarak çekme çatlakları ve aşınmalar meydana gelmektedir. Kaplamada erken dönemde oluşan çekme çatlakları ve aşınmalar hızlı bir şekilde artarak, bakım-onarım masraflarını arttırmakta ve kaplamadan beklenen hizmet kalitesini ve ömrünü azaltmaktadır. Bu çalışmada, performans özelliklerinin iyileştirilerek daha uzun sürelerde hizmet verebilecek SSB kaplama karışım tasarımlarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda sentetik makro ve mikro liflerin hibrit kullanım konsantrasyonlarının SSB karışımların performans özelliklerine etkileri laboratuvar ortamında araştırılmıştır.

Deneysel çalışmada, tek tip agrega ve çimento bağlayıcısı kullanılmıştır. Çimento dozajı tüm karışım gruplarında 350 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Makro lif uzunluğu 60 mm olarak seçilmiş ve karışım hacminin %0, %0,20, %0,40, %0,60 ve %0,80 oranlarında karışıma ilave edilmiştir. Öncelikle, en iyi sonucun elde edildiği makro lif oranı belirlenmiş ve hibrit karışımlar bu karışım oranında hazırlanmıştır. Hibrit karışımlar, hacimce %0,05, %0,10 ve %0,20 oranlarında polipropilen mikro lif ilavesiyle üretilmiştir. Karışımların optimum su içeriği TS EN 13286-4'e göre belirlenmiştir. Titreşimli kompaktör ile hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve aşınma direnci testleri

gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, makro sentetik lif katkılı SSB karışımların mekanik özelliklerin iyileştirdiğini göstermiştir. Basınç ve dolaylı çekme deneylerinde en iyi dayanım sonuçları %0,60 makro sentetik lif ilavesinde elde edilmiştir. Katkı oranı arttıkça aşınma direncinin de iyileştiği gözlemlenmiştir. %0,60 makro lif oranında yapılan hibrit lif denemelerinde optimum mikro lif oranının %0.10 olduğu belirlenmiştir. Hibrit lif kullanımının SSB karışımların dolaylı çekme dayanımı, aşınma dayanımı ve hidrolik geçirgenlik özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit lif takviyesi, makro lif, mikro lif, silindirle sıkıştırılmış beton yol kaplama.



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SYNTHETIC HYBRID FIBER- REINFORCED ROLLER-COMPACTED CONCRETE PAVEMENTS

Abdulbasit ALMOAMAR

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Altan ÇETİN

Bartın-2024, pp: 77

Roller-Compacted Concrete (RCC) pavement, with advantages in cost-effectiveness, mechanical performance, production, and construction, stands out as an alternative to hot-mix asphalt. In RCC pavements, tensile cracks and wear occur due to exposure to heavy traffic loads and environmental effects. The tensile cracks and wear that develop in the early stages of the pavement accelerate rapidly, leading to increased maintenance costs and reducing the expected service quality and lifespan of the pavement. This study aims to develop RCC pavement designs that can provide longer service life by enhancing performance characteristics. To achieve this objective, the effects of hybrid usage concentrations of synthetic macro and microfibers on the performance properties of RCC mixtures were investigated in a laboratory setting.

In the experimental study, a single type of aggregate and cement binder was used, with the cement dosage set at 350 kg/m³ across all mix groups. Macro fiber length was chosen as 60 mm, and it was added to the mixture at volume ratios of 0%, 0.20%, 0.40%, 0.60%, and 0.80%. Initially, the optimal macro fiber content yielding the best results was identified, and hybrid mixtures were prepared at this mix ratio. Hybrid mixtures were produced with polypropylene microfiber additions at 0.05%, 0.10%, and 0.20% by volume. The optimum

water content of the mixtures was determined according to TS EN 13286-4. Compressive strength, indirect tensile strength, and abrasion resistance tests were conducted on samples prepared with a vibrating compactor. The experimental results showed that RCC mixtures with macro synthetic fiber reinforcement improved mechanical properties. The best strength results in compressive and indirect tensile tests were obtained with the addition of 0.60% macro synthetic fiber. It was observed that abrasion resistance also improved as the fiber content increased. In hybrid fiber tests conducted at a 0.60% macro fiber ratio, the optimal microfiber content was determined to be 0.10%. The use of hybrid fibers was found to improve the indirect tensile strength, abrasion resistance, and hydraulic permeability characteristics of RCC mixtures.

Keywords: Hybrid fiber reinforcement, macrofiber, microfiber, roller compacted concrete pavement.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖN SÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
TABLolar DİZİNİ.....	xiiiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KARAYOLU ÜSYAPILARI.....	4
2.1. Esnek Üstyapılar	6
2.2. Rijit Üstyapılar	9
3. SİLİNDİRLE SIKIŞIRILMIŞ BETON KAPLAMALAR	11
3.1. SSB ile Geleneksel Beton Yol Arasındaki Temel Farklılıklar	15
3.2. SSB Kaplamaların Kullanım Alanları	17
3.2.1 Yüksek Hızlı Karayollarında Çok Katmanlı Üstyapı Sistemleri.....	18
3.2.2 Ana Yollar (Caddeler) ve Yerel Yollar (Sokaklar)	18
3.2.3 Genişletme ve Banketler	19
3.2.3 Diğer Uygulama Alanları	19
3.3. SSB Kaplamalardan Beklenen Performans Özellikleri	20
3.3.1 Geometrik Düzgünlük ve Pürüzlülük	21
3.3.2 Kayma-Sürtünme Direnci	21
3.3.3 Basınç ve Eğilme Dayanımı	22
3.3.4 Yorulma Dayanımı.....	22
3.3.5 Donma-Çözülme Dayanıklılığı.....	23
3.3.6 Diğer Özellikler	24
3.4. SSB Karışım Tasarımı	25
3.4.1 Malzeme Seçimi.....	26
3.4.1.1 Agregalar.....	26
3.4.1.2 Bağlayıcı Malzemeler	28
3.4.1.3 Kimyasal Katkılar	29

3.4.1.4 Su.....	30
3.4.2 Karışım Tasarımı Yöntemleri.....	30
3.5. SSB Kaplama Üretim ve Yapım Aşamaları	33
4. BETON VE SSB KAPLAMALARDA LİF KULLANIMI	37
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
5.1. Çalışma Kapsamı	45
5.2. Kullanılan Malzemeler	45
5.2.1 Agregalar	45
5.2.2 Çimento Bağlayıcı	47
5.2.3 Makro Sentetik Lifler	47
5.2.3 Mikro Sentetik Lifler	48
5.3. Deney Yöntemleri.....	49
5.3.1 Optimum Su Muhtevasının Belirlenmesi.....	50
5.3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	51
5.3.3 Tek Eksenli Basınç Deneyi	53
5.3.4 Dolaylı Çekme Deneyi.....	53
5.3.5 Rotating-Cutter Aşınma Dayanımı Deneyi.....	54
5.3.6 Cantabro Aşınma Kaybı Deneyi.....	54
5.3.7 Permeabilite Deneyi	566
6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	57
6.1. Optimum Su Muhtevalarının Belirlenmesi	57
6.2. Tek Eksenli Basınç Deney Sonuçları.....	59
6.3. Dolaylı Çekme Deney Sonuçları	61
6.4. Rotating-Cutter Aşınma Dayanımı Deneyi.....	64
6.5. Cantabro Aşınma Kaybı Deneyi.....	65
6.5. Permeabilite Deney Sonuçları.....	66
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: Antik Roma döneminin dönemine ait taş kaplamalı yollar (Via Apia).....	4
2.2: Karayolu üstyapı tipleri (a) Esnek Üstyapı (b) Rijit Üstyapı.....	5
2.3: Karayolu üstyapı tipleri yük dağılımları (a) Esnek Üstyapı (b) Rijit Üstyapı	6
2.4: Esnek üstyapıda tekerlek yükünün derinlikle azalması.....	7
2.5: Tipik esnek üstyapının kesiti (Suryakanta, 2015)	8
2.6: Tipik rijit kaplama kesiti (Suryakanta, 2015).....	9
3.1: SSB kaplamanın asfalt ve beton yollarla ortak özellikleri (Harrington v.d, 2010).....	13
3.2: SSB ve geleneksel betonların tipik malzeme oranı karşılaştırmaları.....	15
3.3: Porland çimentolu beton ve SSB'ye ait kesitler(Harrington vd., 2010).....	16
3.4: SSB ve geleneksel betonun erken dönem dayanım kapasiteleri (Harrington vd., 2010)	16
3.5: SSB karışım tasarımında göz önünde bulundurulacak faktörler	25
3.6: SSB agrega grupları için gradasyon eğrileri ve karışım karma gradasyonu	28
3.7: Kuru yoğunluk-su muhtevası ilişkisi	31
3.8: Basınç dayanımı-çimento içeriği ilişkisi.....	32
3.9: SSB üretim tesisleri (a) sürekli akış pugmill mikser (b) döner tambur mikser.....	34
3.10: SSB karışımın finişer ile serilmesi	34
3.11: SSB karışımın çift tamburlu titreşimli silindirler ile sıkıştırılması	35
3.12: SSB tabakada enine derz kesilme işlemi.....	36
3.13: SSB tabakada oluşturulan boyuna derz.....	366
4.1: Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi (Betterman vd., 1995).	43
5.1: SSB Karışım Agrega Gradasyon Eğrisi	46
5.2: Makro sentetik lifler.....	48
5.3: Mikro sentetik lifler.....	49
5.4: SSB karışımların optimum su muhtevalarının belirlenmesi (a) Titreşimli kompaktör (b) Su muhtevası numuneleri.....	51
5.5: Deney numunelerinin hazırlanması (a) Lifin agrega harmanı ile kuru olarak karıştırılması (b) Numunelerin titreşimli kompaktör ile sıkıştırılması	52
5.6: Tek eksenli basınç testinin uygulanması (a) Numunenin test cihazına yerleştirilmesi (b) Numunelere çift taraflı kükürt başlık uygulanması	53

5.7: Dolaylı çekme testi.....	54
5.8: “Rotating-Cutter” aşınma cihazı	55
5.9: Cantabro aşınma kaybı deneyi (a) Los Angeles cihazı (b) Deney öncesi ve sonrasında numune örneği	55
5.10: Permeabilite deney cihazı	56
5.11: Permeabilite deneyi numune iç yüzeyinde su işleme derinliğinin belirlenmesi	56
6.1: SSB karışımlara ait modifiye kompaksiyon eğrileri	58
6.2: 7 ve 28 günlük makro lif içeren numunelere ait basınç dayanım grafiği.....	60
6.3: Hibrit lifli numunelere ait 28 günlük basınç dayanım grafiği.....	61
6.4: 7 ve 28 günlük makro lif içeren numunelere ait dolaylı çekme dayanım grafiği	61
6.5: Hibrit lifli numunelere ait 28 günlük dolaylı çekme dayanım grafiği	63
6.6: 28 günlük numunelere ait “Rotating-Cutter” aşınma deney sonuçları.....	64
6.7: Hibrit lif numunelere ait 28 günlük “Rotating-Cutter” aşınma dayanımı deney sonuçları	65
6.8: Sentetik makro lif konsantrasyonu ile Cantabro aşınma kaybı değişim grafiği.....	66
6.9: Hibrit lifli numunelere ait 28 günlük Cantabro aşınma dayanımı sonuçları	666
6.10: Sentetik makro lif konsantrasyonu ile SSB numunelerin hidrolik geçirgenlik değişimi	677
6.11: Hibrit lifli numunelere ait permeabilite deney sonuçları	67

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
3.1: Geleneksel beton kaplamalar ile SSB kaplamaların arasındaki temel farklar	17
3.2: ABD’deki bazı projelere ait SSB karışım tasarımları	31
5.1: Agregâ karışım oranlarının belirlenmesi.....	46
5.2: Çimento bağlayıcıya ait fiziksel özellikler.....	47
5.3: Makro sentetik liflerin fiziksel özellikleri.....	48
5.4: Mikro sentetik liflerin fiziksel özellikleri	49
6.1: Farklı lif katkılı SSB numunelerinin maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su muhtevâsı değeri	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

“	: inç
°C	: santigrat derece
Ac	: numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm ² .
cm	: santimetre
cm ²	: santimetrekare
d	: numunenin seçilen en kesit boyutu, mm
dk	: dakika
F	: kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,
F	: en büyük yük, N
f _c	: basınç dayanımı, MPa (N/mm ²),
f _{ct}	: yarmada çekme dayanımı, MPa (N/mm ²)
g	: gram
kg	: kilogram
kg/m ²	: kilogram/metrekare
kg/m ³	: kilogram/metreküp
km/sa	: kilometre/saat
kPa	: kilopascal
L	: numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğu, mm
m	: metre
m ²	: metrekare
m ³	: metreküp
mm	: milimetre
MPa	: megapascal
N	: newton
sa	: saat
W1	: aşınmamış numune ağırlığı, g
W2	: aşınmış numune ağırlığı, g
W _{opt}	: optimum Su Muhtevası
µm	: micrometre

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACI	: American Concrete Institute Committee
AEA	: Air-Entraining Agent
APA	: Asphalt Pavement Association
ASSTHO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASSTHO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
EN	: Avrupa Normu
et al	: And Others
F-T	: Freeze-Thaw
HDPE	: High-Density Polyethene
HMA	: Hot Mix Asphalt
NMAS	: Nominal Maksimum Agregat Boyutu
PCC	: Portland Cement Concrete
PP	: Polipropilen
SSB	: Silindire Sıkıştırılmış Beton
TS	: Türk Standartları
USACE	: United State Army Corps of Engineers
vb	: ve benzeri
vd	: ve diğerleri

1. GİRİŞ

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB), karayolu üstyapıları, baraj ve liman inşaatları başta olmak üzere birçok alanda uygulanabilmektedir. SSB kaplamalar, rijit yol üstyapı yapımında kullanılan bir yöntem olup, geleneksel beton kaplamalardan daha yenidir. Bu kaplamalar, serim ve sıkıştırma aşamalarında esnek üstyapı yapımına benzer teknikler kullanılarak inşa edilir. SSB kaplamalar, yol ömrü süresince düşük bakım ve onarım maliyetleri, yüksek sürüş güvenliği, bitümlü kaplamalardan daha az tekerlek yuvarlanma direnci ve geleneksel beton kaplamalardan daha hızlı trafiğe açılma gibi avantajlara sahiptir. SSB kaplamalar, geleneksel beton kaplamalara kıyasla çok daha düşük su/çimento oranıyla (0,35-0,45) üretilir ve bitümlü kaplama yöntemlerinde kullanılan ekipmanlarla taşınır, serilir ve sıkıştırılır. Bu özellikleri, SSB kaplamaların hızlı ve ekonomik bir şekilde inşa edilmesini sağlar, böylece alternatif bir üstyapı çözümü olarak öne çıkar. Önceleri genellikle ağır yük taşıyan ve düşük hızla kullanılan endüstriyel alanlarda tercih edilen SSB kaplamalar, son yıllarda şehir içi yollar ve şehirlerarası anayollar gibi daha çeşitli uygulama alanlarına da yayılmaktadır. SSB yol kaplamaları, yapımında kullanılan ekipmanın ve yapım yönteminin Bitümlü Sıcak Karışımlarla (BSK) aynı olduğundan İl Özel İdaresi ve belediyelerimizin bünyesinde bulunan mevcut ekipman ve yetişmiş eleman ile kolaylıkla uygulanabilir niteliktedir.

SSB karışımların su/çimento oranını düşük olması büzülmeye bağlı çekme gerilmelerinin ve rötre çatlaklarının azalmasına sebep olsa da beton çekme dayanımı düşük bir malzemedir. Trafik yükleri altında beton plakta şekil değiştirme ve gerilmeler (basınç, çekme ve eğilme) meydana gelir. Taşıt yükleri ve hızlarına bağlı olarak ve çevresel etkenlerden (nem, sıcaklık) dolayı plağın alt ve üst yüzeylerinde oluşan gerilme etkilerinin tekrarı beton plakta yorulmaya neden olmaktadır. Mekanik etkilerin yanı sıra yağmur, kar, buzlanma ve buz çözücü tuzlar gibi ortam ve kullanım şartlarından kaynaklanan faktörler de beton yol kaplamasını etkilemektedir. Trafik yükleri ve çevresel faktörler beton kaplamada erken bozulmalara ve hizmet ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, SSB kaplama tasarımlarının farklı yaklaşımlarla teknik ve ekonomik açılardan geliştirilmesi, uygulamaların başarısı ve yaygınlaştırılması için önemlidir.

Betonun en büyük dezavantajı çekme dayanımının düşük olmasının yanı sıra kırılğan bir yapıda olmasıdır. Bu noktada, çelik lifler, doğal lifler (odun lifleri, yün, keten ya da pamuk

lifler), yapay lifler (cam yünü, plastik esaslı lifler) beton içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Lif modifikasyonu betonun çekme dayanımı yanında tokluğu, aşınma direnci, enerji yutma kapasitesi, çatlamlara karşı dayanımı ve sünekliğinin iyileştirilmesinde de katkı sağlamaktadır (Arısoy, 2005). Yol kaplaması olarak kullanılan rijit plakların maruz kalacağı çekme gerilmesinin karşılanarak çatlak ve kırılmaların kısmen önlenmesinde, beton içerisinde kullanılan lifler etkili olmaktadır. Üretildikleri malzemelerin farklı özelliklerinden dolayı lifleri genel olarak metalik lifler (çelik vb.), polimerik lifler (karbon, polietilen, polipropilen vb.), mineral lifler (cam yünü vb.) ve doğal lifler (yün, keten, pamuk, odun vb.) olmak üzere 4 grupta toplamak mümkündür (Şengül, 2005). Liflerin boyutu genellikle narinlik oranıyla tanımlanır. Narinlik oranı, lifin uzunluğunun (L) çapına (d) olan oranını ifade eder. Lifli betonlarda, betonun özelliklerini önemli ölçüde etkileyen başlıca faktörler arasında lif tipi, geometrisi, narinlik oranı ve lif miktarı bulunmaktadır. Beton üzerindeki çatlakların mikro düzeyde başlayarak etkili bir şekilde kontrol altına alınması, mikro ve makro liflerin kullanımıyla sağlanabilir. Mikro lifler, küçük boyutları sayesinde beton matrisinde daha yoğun bir dağılım oluşturarak çatlakların makro düzeye ulaşmadan yavaşlamasına ve elastik bölgedeki performansın iyileşmesine yardımcı olur. Öte yandan, makro lifler, elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını artırarak makro düzeydeki çatlakları kontrol altında tutar ve maksimum yük sonrası betonun davranışını geliştirir. Sentetik mikro lifler ise betonda yüzey nemi kaybından kaynaklanan erken yaştaki plastik rötre çatlaklarının görünümünü en aza indirmek amacıyla 1980’lerde uygulanmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, sentetik mikro liflerin betonun yük-sehim tepkisini iyileştirmediği ve bu nedenle beton döşeme ve kaplamaların yapısal tasarımında yeterli düzeyde iyileştirme sağlayamadığı belirlenmiştir. Sentetik makro lifler, beton malzemelerin ve plakların eğilme tokluğunu iyileştirmek için çelik makro liflere alternatif bir malzeme olarak yaklaşık 20 yıl önce kullanılmaya başlanmıştır. Kaplamalar için lif takviye teknolojisi, beton kaplamaların yorulma ömrünü iyileştirmek için çelik makro liflerin kullanıldığı araştırma ve uygulamaları uzun yıllardır kullanılmaktadır. Beton kaplama performansına sağladığı kanıtlanmış faydalarına rağmen, çelik makro lifler için önerilen yüksek hacimli fraksiyonlar, karışım tasarımı değişikliklerinin gerekliliği, inşa edilebilirlik sorunları, korozyonla ilgili endişeler nedeniyle çelik lif takviyeli betonu tercih edilmeyen bir seçenek haline getirmiştir. Polipropilen lifler genellikle boyutuna göre mikro ve makro olarak ikiye ayrılır. Mikro polipropilen lifler, betonun erken çatlaklarını önemli ölçüde engelleyebilir, ancak beton üzerinde belirgin bir güçlendirme ve toklaştırma etkisi yoktur.

Çelik lifin ikame malzemesi olarak da bilinen makro polipropilen lifler, çelik lif ile karşılaştırılabilir güçlendirme ve toklaştırma etkisine sahiptir. Birçok araştırma, hibrit lif takviyeli betonun, farklı liflerin birbirini tamamlamasını ve beton matrisinin mekanik özelliklerini geliştirmesini sağlayabildiğini göstermiştir. Özellikle, mikro ve makro-polipropilen liflerin belirli bir oranda beton matrisine hibrit ilavesi, tek bir lif ilavesinden daha iyi performans göstermiştir.

Bu çalışmada, çevresel etkiler ve trafik yükleri altında SSB kaplamaların yukarıda belirtilen dayanım özelliklerinin iyileştirilerek daha uzun sürelerde hizmet verebilecek karışım tasarım önerisi sunulması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, makro ve mikro liflerin hibrit kullanımı için katkı oranlarının SSB'lerin dayanım özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada hem tek başına makro liflerin hem de hibrit lif ilavesinin etkileri incelenerek optimum lif ilave oranları belirlenmiştir. Laboratuvarda, lif katkıları için farklı hibrit ilave oranlarında hazırlanan karışımların titreşimli kompaktör yöntemi ile belirlenen optimum su oranında üretilen numuneler üzerinde 7 ve 28 günlük kür süreleri için basınç ve dolaylı çekme deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca karışım numuneleri üzerinde aşınma ve permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı hibrit lif oranları için gerçekleştirilen deney sonuçları değerlendirilerek optimum karışım oranları belirlenmiştir.

2. KARAYOLU ÜSTYAPILARI

Karayolu üstyapıları, araçlar için dayanıklı ve düzgün bir yüzey sağlamak amacıyla tasarlanmış, ulaşım altyapısının kritik bileşenleridir. Esnek üstyapılar ve rijit üstyapılar olmak üzere temelde iki tür karayolu üstyapısı bulunmaktadır. Her bir tür, trafik yükü, çevresel ve ekonomik koşullar gibi faktörlere dayalı olarak farklı özellikler, avantajlar ve uygulamalar sunmaktadır. Yol üstyapısı, hareket etmeyi, taşımayı ve geçişi kolaylaştırmak için açık bir genel güzergahtır. Bu tür yolların kaplanması, onları güçlü, dayanıklı, sağlam ve çevre ile trafik koşullarına dayanıklı hale getirir. En eski taş kaplama yollar bile yüksek dayanıklılık ve kaliteleri sayesinde günümüze kadar gelebilmiştir. Örneğin, Şekil 2.1’de görülen Roma’daki Via Appia, büyük taşlarla kaplanmıştır (Berechman, 2003). Ekonomik yollar olarak bilinen Macadam ve Telford gibi yollar, kullanılmamış taşların değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Yol dayanıklılığı ve taşların birbirine bağlanması amacıyla, 18. yüzyılın sonlarına doğru bağlayıcı maddeler kullanılmaya başlanmıştır (Szostak, 1991). Modern özelliklerini alan ve dünya genelinde inşa edilen iki ana yol kaplama türü, rijit ve esnek kaplama, 19. yüzyılın sonlarına doğru yaygınlaşmıştır (Berechman, 2003). Günümüzde, yolların inşası, herhangi bir ülkenin gelişimi için temel bir ölçü ve medeniyet ilerlemesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Mühendislikte kaplama, bir yol, havaalanı veya benzer bir alanın dayanıklı döşemesi olarak tanımlanabilir ve temel işlevi yükleri alt tabaka ve altındaki toprağa azaltarak iletmektir. Yol kaplaması, taşıtların seyahat ettiği yol üstyapısının en üstteki yüzey tabakasıdır. Bu tabakanın temel amaçları, taşıtların oluşturduğu normal gerilme seviyelerini alt tabakaya azaltarak iletme, araçlara düzgün bir sürtünme yüzeyi ve yol yüzey drenajını sağlamaktır (Otti vd., 2016).



Şekil 2.1: Antik Roma döneminin dönemine ait taş kaplamalı yollar (Via Appia)

Yapısal performanslarına ve kullanılan malzemelere bağı olarak iki temel kaplama tipi vardır: Esnek üstyapı (sıcak asfalt betonu) ve rijit üstyapı (Portland çimentosu betonu) (Şekil 2.2). Esnek üstyapılar, yüzeyi bitümlü (veya asfalt) malzemelerle kaplanmış olanlardır. Bu, daha düşük hacimli yollarda yaygın olarak bulunan sathi kaplamalar şeklinde veya daha yüksek hacimli yollarda, örneğin otoyol ağında kullanılan sıcak karışım asfalt (Hot Mix Asphalt-HMA) yüzey tabakaları şeklinde olabilir. Bu tür üstyapılar, toplam üstyapının trafik yüklerinin oluşturduğu deformasyona kırılmadan müsaade ettiğinden dolayı “esnek” olarak adlandırılır. Esnek bir kaldırım yapısı genellikle bu "esnemeyi" karşılayabilen birkaç katman tabakadan oluşur. Rijit üstyapılar, Portland çimentolu beton (Portland Cement Concrete-PCC) yüzey tabakasından oluşur. Bu tür üstyapılar, PCC malzemesinin yüksek elastik modülü nedeniyle esnek kaldırımlardan önemli ölçüde "daha rijittir" (AASHTO, 2015). Ayrıca, bu üstyapılarda, ek yerlerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için genellikle kullanılan takviye çeliği kullanılabilir.

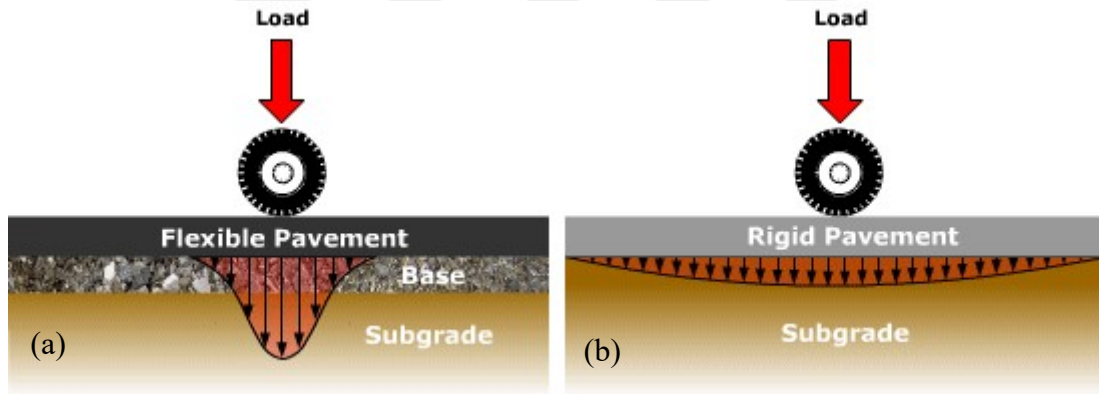


Şekil 2.2: Karayolu üstyapı tipleri (a) esnek üstyapı (b) rijit üstyapı

Kaplama türünün seçiminde ekonomik kararlar büyük bir etkiye sahiptir, ancak malzemenin ve yüklenicilerin bölgedeki bulunabilirliği gibi faktörlere bağı olarak maliyet değişebilir. Trafik, iklim, malzeme ve maliyet gibi tasarım kriterlerine bağı olarak rijit ve esnek kaplamaların kullanım uygunluğu üzerine karşılaştırmalı incelemeler sunana birçok çalışma mevcuttur. Yol üstyapı seçimi, teknik, ekonomik ve çevresel faktörlere bağıdır. Ayrıca güvenlik ve bakım koşulları da dikkate alınmaktadır. Asfalt Kaplama Birliği (Asphalt Pavement Association-APA)’ya göre üstyapı seçiminde dikkate alınması gereken başlıca faktörler: trafik, iklim, geri dönüşüm malzemeleri, mevcut yol özellikleri, inşaat aşamaları ve maliyet karşılaştırma. İkincil faktörler ise; yerel malzeme tedariği, bölgedeki benzer

kaplamaların performansı, mevcut kaplamalar, malzeme ve enerji koruma ve trafik güvenliği gibi konulardır (AASHTO, 1993). Genel olarak, bir üstyapı türünün tercih nedeni karmaşık olabilir. Temelde, karayolu otoriteleri üstyapı türünü genellikle politika, ekonomi veya her ikisiyle seçerler. Esnek üstyapılar genellikle her 10 ila 15 yılda bir bakım veya rehabilitasyon gerektirir. Öte yandan, rijit üstyapılar genellikle 20 ila 40 yıl boyunca çok az bakım veya rehabilitasyon ile hizmet verebilir. Dolayısıyla, rijit üstyapıların genellikle kentsel, yoğun trafik alanlarında kullanılması şaşırtıcı değildir. Ancak, doğal olarak, bazı istisnalar söz konusudur. Örneğin, esnek bir üstyapının büyük bir rehabilitasyona ihtiyacı olduğunda, seçenekler genellikle rijit üstyapılara göre daha ucuz ve daha hızlı uygulanabilir.

Bu kaplama tiplerinin her biri yükü alt tabakaya farklı şekilde dağıtır. Rijit kaplama, PCC'nin yüksek elastik modülü (rijitliği) nedeniyle yükü nispeten geniş bir alt tabaka alanına dağıtma eğilimindedir (Şekil 2.3). Beton plak, rijit bir üstyapının yapısal taşıma kapasitesinin çoğunu sağlar. Esnek üstyapı, daha esnek bir yüzey tabakası kullanır ve yükleri daha küçük bir alan üzerine dağıtır. Yükü alt tabakaya iletmek için katmanların birleşimine güvenir.

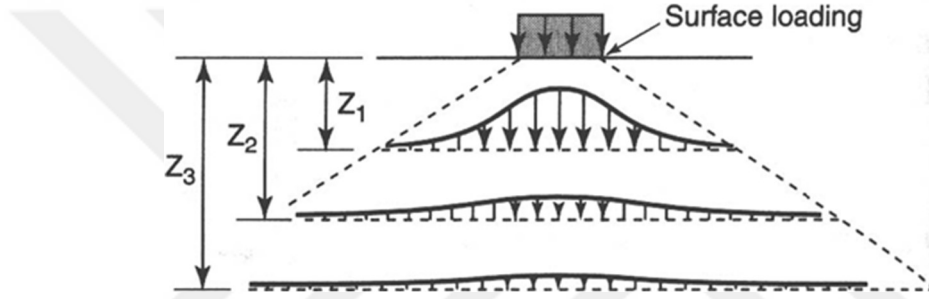


Şekil 2.3: Karayolu üstyapı tipleri yük dağılımları (a) esnek üstyapı (b) rijit üstyapı

2.1. Esnek Üstyapılar

Esnek üstyapılar, tekerlek yükü gerilimlerini, granüler yapıdaki temas noktaları aracılığıyla tane-tane transfer ederek alt katmanlara iletmektedir. Esnek üstyapılar trafik yükü etkisini absorbe edecek yeterli esnekliğe sahiptir (Yazdani, 2018). Tekerlek yükü kaplamaya etki ettiğinde, yük daha geniş bir alana dağıtılır ve derinlikle birlikte gerilim azalır (Şekil 2.4). Gerilim dağılımı özelliğinden yararlanarak, esnek üstyapılar genellikle çoklu katmandan oluşur. Bu nedenle, esnek üstyapı tasarımı, katmanlı sistem konseptini kullanır. Buna dayanarak, esnek üstyapı birden fazla katman halinde inşa edilebilir ve en üst katman,

maksimum basınç gerilmesine ek olarak aşınma ve yıpranmaya dayanacak en iyi kalitede olmalıdır. Alt katmanlar daha az miktarda gerilime maruz kalacağından düşük kaliteli malzeme kullanılabilir. Esnek üstyapılar bitümlü malzemeler kullanılarak inşa edilir. Bu malzemeler, düşük hacimli yollarda yaygın olarak uygulanan bitümlü yüzey işlemleri (sathi kaplamalar) veya devlet karayolları gibi yüksek hacimli yollarda kullanılan asfalt beton yüzey tabakaları şeklinde olabilir. Esnek üstyapı tabakaları, alt tabakaların deformasyonlarını yüzey katmanına yansıtır (örneğin, alt tabakada herhangi bir oturma varsa bu yüzey katmanına iletilecektir). Esnek üstyapı tasarımı, üstyapının genel performansına dayanır ve ortaya çıkan gerilmeler, her bir üstyapı katmanının izin verilen gerilimlerinin altında tutulmalıdır.



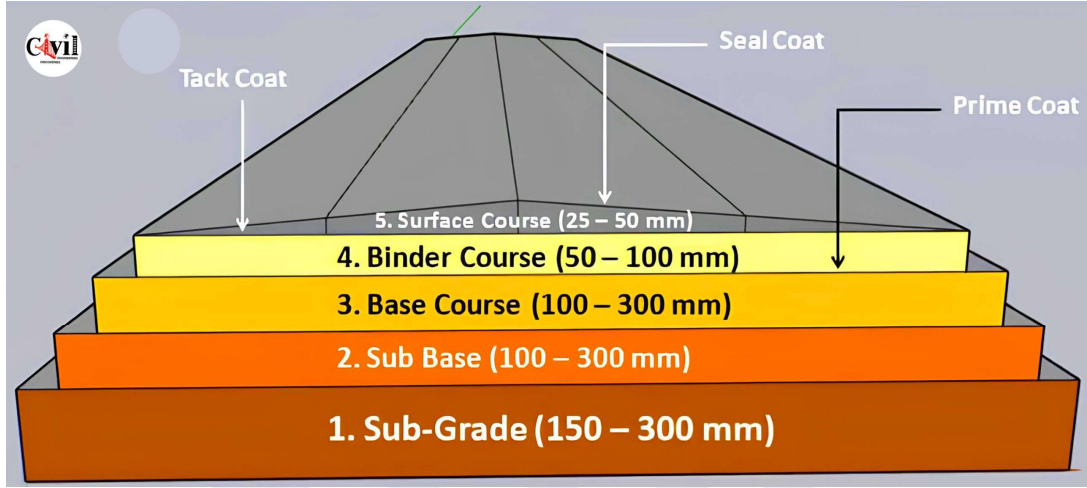
Şekil 2.4: Esnek üstyapıda tekerlek yükünün derinlikle azalması

Esnek üstyapıda yapısal açıdan farklı uygulamalar kullanılmaktadır:

- Geleneksel esnek üstyapı: Yüksek kalitede pahalı malzemelerin üst katmanlarda, gerilimlerin yüksek olduğu yerlere yerleştirildiği ve düşük kalitede ucuz malzemelerin alt katmanlara yerleştirildiği katmanlı sistemlerdir.
- Tam derinlik asfalt üstyapılar: Bitümlü katmanların doğrudan toprak alt tabakaya (taban zemini) yerleştirilmesiyle inşa edilir. Bu, yüksek trafik olduğunda ve yerel malzeme kaynaklarının kısıtlı olduğu durumlarda daha uygundur.
- Kaya asfalt destekli plak sistem: İki asfalt katmanı arasına yoğun/açık dereceli agrega katmanlarının yerleştirilmesiyle inşa edilir. Taban zemini üzerine yerleştirilen modifiye yoğun dereceli asfalt beton, toprak alt tabakadaki (taban zemini) dikey basınç gerilimini önemli ölçüde azaltır ve yüzey suyundan korur.

Esnek üstyapı tipik olarak sıkıştırılmış doğal zemin üzerine inşa edilen alttemel ve temel tabakaları ile asfalt betonu binder ve aşınma tabakasından oluşmaktadır (Şekil 2.5). Temel

ve alt temel tabakası sıkıştırılmış kırma taş granüler tabakalardan veya bitüm, kireç ve çimento ile stabilize edilebilir (AASHTO, 1993). Yüzeydeki aşınma tabakası ve binder tabakası, ortam sıcaklıklarında rijit bir yapı oluşturmak için belirli sıcaklıklarda bitüm ve agreganın tasarım değerlerinde karıştırılıp sıkıştırılması ile oluşan sıcak asfalt betonudur (Mohod ve Kadam, 2016).



Şekil 2.5: Tipik esnek üstyapının kesiti (Suryakanta, 2015)

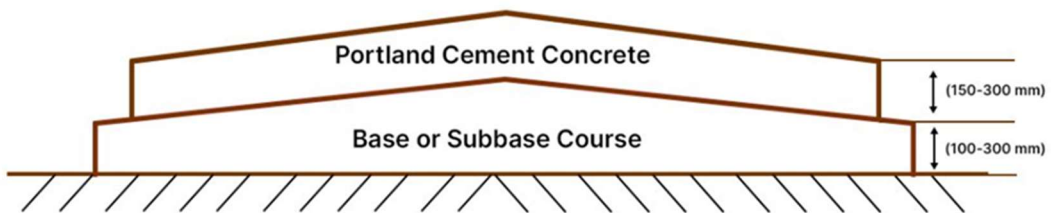
Esnek kaplamalar, yükler altında esneyebilme yetenekleri ile bilinirler ve gerilmeyi daha geniş bir alana yayabilirler. Bu özellik, çeşitli trafik koşulları ve iklimler için uygun olmalarını sağlar. Temel performans özellikleri şunlardır:

- Esnek kaplamalar, katmanlı bir sistem aracılığıyla araç yüklerini dağıtarak alt zemine binen gerilmeyi azaltırlar. Bu yükleri yayma yetenekleri, hatta yoğun trafik altında bile yapısal başarısızlık riskini minimize eder (Huang, 2004).
- Alt zemindeki hafif hareketlilikleri ve çökmeleri önemli çatlama veya yapısal hasar olmadan karşılayabilirler. Bu uyum, değişken alt zemin koşullarının bulunduğu alanlar için uygun olmalarını sağlar (Roberts vd., 1996).
- Esnek kaplamaların bakımı genellikle yüzey işlemleri, kaplama ve küçük onarımları içerir. Kaplama işlemleri kaplamanın ömrünü uzatabilir ve yenileme işlemleri, rijit kaplamalara kıyasla daha basittir (Yoder ve Witczak, 1975).
- Sıcaklık değişimlerine daha duyarlı olabilirler; bu durum yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi ve düşük sıcaklıklarda çatlama riski oluşturabilir. Doğru malzeme seçimi ve tasarım, bu sorunları azaltabilir (Huang, 2004).

2.2. Rijit Üstyapılar

Bu kaplama, asfalt kaplamaya kıyasla yüzeydeki beton kaplama tabakasından dolayı rijit bir davranış gösterir. Yüksek eğilme mukavemeti sayesinde tekerlek yüklerini çok az seviyede taban zeminine ileten rijit bir plaka gibi çalışır (Wimsatt vd., 2009). Rijit beton kaplama tabakası, kaba ve ince agregası, su, Portland çimentosundan oluşur ve genellikle çelik hasır donatı ile güçlendirilir. Rijit üstyapı, hazırlanmış doğal zemin üzerinde alt temel veya temel tabakası ve bir Portland çimentolu beton plak olarak inşa edilir (Şekil 2.6). Bu üstyapı tipi, genellikle havalimanları ve trafik hacmi ve ağır taşıt trafiği oranı yüksek olan otoyolların yapımında tercih edilirler. Portland çimento betonu (Portland Cement Concrete-PCC), beton ve çimento içeren farklı isimlerle tanımlanan rijit kaplamaların yapımında kullanılan en yaygın malzemedir. PCC'yi ayırt etmek için üretim yöntemleri ve tasarımı kullanılır. 19. yüzyılda icat edilen ve 1889'da inşa edilen ilk rijit üstyapıda istimal edilen PCC, kullanılabilirliği ve ekonomisinden kaynaklı bir popülerite kazanmıştır (Soedirdjo vd., 2003). Rijit üstyapılar dört farklı tipte sınıflandırılır (Mohod ve Kadam, 2016):

- Derzli donatısız beton kaplama: Yakın aralıklı genleşme derzleri ile inşa edilmiş donatısız beton kaplamalardır. Genellikle derzler arası yük transferi için kayma donatıları veya derz yüzey sürtünmesi (agrega kilitleri) kullanılır. Normalde derz aralıkları 5 ila 10 metre arasındadır.
- Derzli donatılı beton kaplama: Donatılar yapısal kapasiteyi önemli ölçüde artırmazlar, ancak derz aralıklarını 10 ila 30 metre arasında büyük ölçüde artırabilirler. Yük transferi için kayma çubukları gereklidir. Donatılar çatlaklar oluşsa bile beton levhayı bir arada tutmaya yardımcı olurlar.
- Derzsiz donatılı beton kaplama, Kullanılan çok fazla donatıdan dolayı uzun ömürlüdür. Fakat çok fazla maliyeti olduğundan çok tercih edilmez. Genelde havaalanlarında yapılır.
- Öngerilmeli beton kaplama.



Şekil 2.6: Tipik rijit kaplama kesiti (Suryakanta, 2015)

Rijit kaplamalar, beton levhanın sertliği ve kiriş etkisi ile yükleri daha geniş bir alana dağıtabilme özelliği ile karakterizedir. Temel performans özellikleri şunlardır:

- Beton kaplama, rijitliği sayesinde yükleri dağıtarak taban zemini üzerindeki gerilmeyi azaltır. Bu kiriş etkisi, rijit kaplamaların daha az deformasyonla daha ağır yükleri desteklemelerini sağlar (Huang, 2004).
Rijit kaplamalar, uzun hizmet ömrü ve dayanıklılık ile bilinirler. Ağır trafik yüklerine ve zorlu çevresel koşullara minimal bakım ile dayanabilirler (Yoder ve Witczak, 1975).
- Rijit kaplamaların bakımı genellikle derz sızdırmazlık, çatlak onarımları ve levha değişimlerini içerir. İlk inşaat maliyetleri daha yüksek olsa da, uzun vadeli bakım maliyetleri esnek kaplamalara göre daha düşük olabilir (Huang, 2004).
- Rijit kaplamalar sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenir ancak termal genleşme ve büzölmeye bağlı olarak çatlama riski olabilir. Doğru derz tasarımı ve inşaat, bu sorunları azaltabilir (Roberts vd., 1996).

3. SİLİNDİRLE SIKIŞIRILMIŞ BETON KAPLAMALAR

SSB kaplamalar genellikle, BSK kaplamalarının yapımına benzer teknikler kullanılarak inşa edilen sıfır çökmeli beton karışımları olarak tanımlanır. SSB, geleneksel beton karışımları ile aynı bileşenlerden (bağlayıcı malzemeler, su, kırma agrega ve kum) oluşur. Ancak, daha kuru bir karışımdır ve nemli agrega gibi görünür. Karıştırıldıktan sonra, karışım yol üzerine bir asfalt serici kullanılarak yerleştirilir ve ardından çelik tekerlekli titreşimli silindirlerle sıkıştırılır. SSB genellikle geleneksel beton kaplamalar gibi kalıplar, dübeller, derzler veya donatı kullanılarak inşa edilmez ve yüzey işlemesi gerektirmez. SSB, yıllardır barajlar, kereste depolama alanları, ağır taşıma yolları, yükleme rıhtımları, intermodal liman tesisleri ve otoparklar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. SSB'nin en yaygın kullanımı baraj inşaatında olmuştur. SSB kullanımının inşaat süresindeki önemli azalma nedeniyle baraj inşaatı sürecinde son yıllarda en büyük gelişme olduğu belirtilmiştir (ACI Committee 207, 1999). Son zamanlarda, SSB sokaklar, otoyollar ve havaalanı kaplamaları için daha fazla öne çıkmaktadır.

SSB kaplamalar, yüksek mukavemeti, yoğunluğu ve dayanıklılığı ile limanlar, intermodal ve askeri tesisler, karayolu kaplamaları, sokaklar ve otoyol yapımında hızlı ve ekonomik bir çözümdür. SSB kaplamaları, otoparklar ve depolama alanları için iyi bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, SSB, kompozit sistemlerde ana yapı malzemesi olarak da kullanılabilir. Kamu ve özel projelerde SSB'nin kullanımı, özellikle düşük hacimli yol ve park alanları inşasında son yıllarda önemli ölçüde artmaktadır (Pittman, 2009).

SSB kullanımı, yollar için nispeten yenidir ve bu teknoloji hala gelişmektedir. Son on yılda, Kuzey Amerika'da SSB kullanılarak birkaç büyük yol projesi gerçekleştirilmiştir ve bu yolların performansı genel olarak başarılı olmuştur. SSB yollar, ayrıca birkaç Avrupa ülkesinde ve Avustralya'da da kabul görmektedir.

Kuzey Amerika'daki ilk SSB kaplama, 1940'ların başında Washington, Yakima'da bir havaalanı pisti olarak inşa edilmiştir ve benzer bir kaplama türü İsveç'te 1930'larda rapor edilmiştir (ACI, 2001). 1976 yılında, SSB kaplama alternatifi Kanada, British Columbia'da sunulmuştur. Bu kaplamanın başarısı, Kanada içinde birkaç proje ile devam etmiştir ve bunun sonucunda ABD Ordusu Mühendisler Birliği (United State Army Corps of Engineers-USACE) malzemenin potansiyel kullanımını daha fazla araştırmaya karar vermiştir. USACE tarafından tasarlanan ve inşa edilen ABD'deki ilk tam ölçekli SSB kaplama uygulaması,

1984 yılında Teksas, Ft. Hood'da 3,75 dönümlük bir tesistir. Projede, 5,52 Mpa eğilme mukavemetine sahip 10 inç'lik bir plaka kalınlığında bir SSB kaplama inşa edilmiştir. Bu proje, maksimum agrega boyutu, tek veya çoklu katman inşaat yöntemleri, sıkıştırma, kütleme ve SSB'nin numunelendirilmesi gibi belirli konularda bilgi üretmiştir. Bu projenin başarılı olduğu belirlenmiş ve diğer endüstriler de SSB kaplamaları benimsemeye başlamıştır. Bunlar arasında Houston ve Denver'daki Burlington Northern demiryolu intermodal tesisleri, Washington Eyaleti'ndeki Tacoma Limanı ve Massachusetts, Boston'daki Conley ve Moran Deniz Terminalleri bulunmaktadır.

Büyük otoparklar da SSB ile kaplanmıştır. 1980'lerin sonunda, Tennessee, Spring Hill'deki General Motors Saturn otomobil fabrikasında 134 dönümlük bir alan ve New York, Ft. Drum'da 89 dönümlük bir alan kaplanmıştır (ACI, 2001). Bu kaplamalar sırasıyla 20,3 ve 25,4 cm kalınlığında olup, geleneksel beton kaplamalara benzer basınç ve eğilme mukavemetlerine sahiptir. Daha sonra, Alabama'daki Honda üretim tesisinde 207 dönümlük bir otopark alanı da SSB ile kaplanmıştır (Adaska, 2008).

SSB'nin geleneksel yol kaplaması olarak kullanımı o zamanlardan beri genişlemiş ve bir dizi kuruluş tarafından uygulanmıştır. Portland, Oregon ve Columbus, Ohio gibi şehirlerdeki belediye sokakları ve ikincil otoyolların yanı sıra, Kanadaki bazı şehirlerde de bu kaplama türü uygulanmıştır. Missouri, Tennessee, Güney Carolina, Georgia ve Kansas eyaletlerinde de SSB yol kaplaması olarak kullanılmıştır (Kim, 2007).

Türkiye'de SSB kullanımı 2000'li yıllarda küçük ve deneysel projelerle başlamış, 2010'lu yıllarda belediyeler ve devlet kurumları tarafından parklarda, kaldırımlarda ve şehir içi yollarda yaygınlaşmıştır. 2015'ten sonra limanlar, havaalanları ve lojistik merkezler gibi büyük projelerde kullanılmaya başlanmış, son yıllarda bazı otoyol ve yol projelerinde tercih edilmiştir. Akademik araştırmalar ve özel sektörün katkıları sayesinde SSB kullanımı artmaktadır.

Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, SSB yollar, beton ve asfalt yolların çeşitli özelliklerini ve uygulamalarını birleştirmektedir. SSB yollar, asfalt yolların agrega gradasyonuna sahip olup yapım aşamaları benzer olsa da malzemeler ve yapısal performansları bakımından geleneksel beton yollara benzemektedir.



Şekil 3.1: SSB kaplamanın asfalt ve beton yollarla ortak özellikleri (Harrington v.d, 2010)

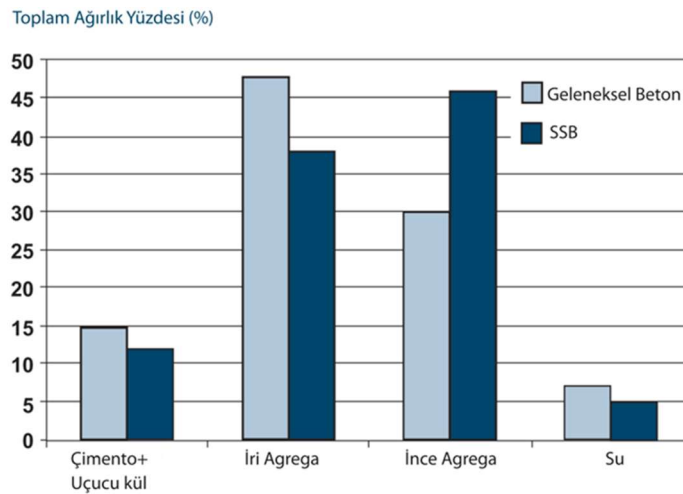
İyi derecelendirilmiş agregalar, uygun çimento ve su içeriği yoğun sıkıştırma ile, SSB yollar çok düşük geçirgenlik ile geleneksel betonla eşdeğer mukavemet özelliklerine ulaşabilir. SSB karışımlar, asfalt serme ve sıkıştırma ekipmanları homojen bir şekilde işlenebilecek kıvamda olmalıdır. Harcın agregada yüzeylerini kaplaması ve boşlukların doldurulması için uygun karışım oranlarına sahip olması önemlidir. Agregada yüzeylerinin çimento hamuruyla yeterince sarılması, yüksek dayanıklılık ve bozulmalara karşı direnç için gereklidir, ayrıca agregalar arasında sağlam bir kenetlenme sağlar. Kompaksiyon, yol yapımında kullanılan agregaların sıkıştırılması işlemidir; bu süreçte özellikle hava boşluklarının azaltılması ve yoğunluğun artırılması hedeflenir. Yoğunlaştırılmış yollar, yük taşıma uygulamaları için daha uygun hale gelir. Sıkıştırma işlemi, çimento hamurunun agregalar arasında hidrasyon ve sertleşmeye başlamasından hemen önce yapılmalıdır. Doğru yoğunluğun sağlanması, eşit olmayan çökmelerin ve zayıf bölgelerin oluşumunu önler. Özel karışımlar ve kullanılan serim ekipmanlarına bağlı olarak, silindirlerle yapılan mekanik kompaksiyon %5 ila %20 arasında hacim azalmasına neden olabilir. SSB karışımlarındaki hava boşluklarının en aza indirgenmesi, SSB'lerin dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir. Fazla hava boşluğu, malzemenin zayıflamasına ve donma-çözünme etkilerine maruz kalmasına neden olabilir. En iyi performans özellikleri, SSB karışımının homojen olduğu ve maksimum yoğunluğa ulaşıldığı zaman elde edilir. SSB kaplamanın yoğunluğunun azalması, kaplamanın mukavemetini önemli ölçüde azaltır (Schrader, 1992).

Karayolu inşaatında kullanılacak yeni bir teknolojiyi veya malzemeyi araştırırken, onun başarı potansiyelini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek önemlidir. Tasarım ve performans özellikleri araştırılmalı ve olası sorunlar öngörülmelidir. Birçok deneyim, SSB kaplamaların çeşitli karayolu uygulamalarında başarılı bir şekilde uygulanmasına işaret etmiştir. Konsept olarak SSB kaplamalar maliyet, performans ve inşaat süresi açısından bir dizi avantaj sunar. Artan petrol maliyetleri ve bunun sonucunda asfalt endüstrisinde ortaya çıkan belirsizlik ışığında SSB, uygun fiyatlı otoyol inşaatı için geçerli bir alternatif sunmayı hedefliyor. SSB, geleneksel beton ve asfalt yol kaplamalarına göre bir dizi avantaj sunmaktadır. Azaltılmış çimento kullanımı sayesinde SSB, daha az büzülme ve gerilme yaşatır. Ağır endüstri, madencilik ve yoğun yüklerin bulunduğu alanlarda yüksek dayanım gösterirken, düşük geçirimsizliği sayesinde kimyasal bozulmalara ve donma-çözünme döngülerine karşı son derece dayanıklıdır. Tekerlek izi ve bakım gereksinimlerini ortadan kaldırarak maliyet ve zaman tasarrufu sağlar. Ayrıca, çevresel etkileri azaltarak ısılandırma ihtiyacını minimize eder ve hızlı bir şekilde trafiğe açılabilir. Esnek malzeme seçenekleri ve farklı kalınlıklarda uygulanabilme özelliği ile çeşitli kullanım alanlarına uygun çözümler sunar.

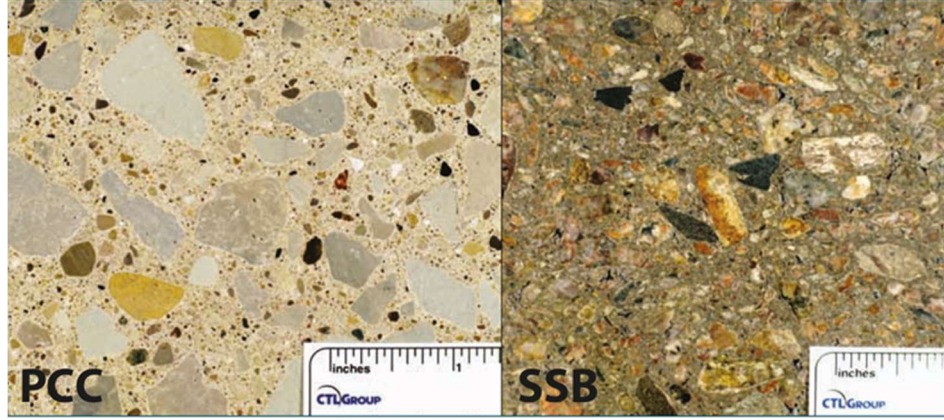
SSB yapıların bazı dezavantajları bulunmaktadır. SSB yapılarında, özellikle yeterli kürleme önlemleri alınmadığında, çatlak oluşumu önemli bir sorun olabilir. Bu çatlak oluşma eğilimi, yapının bütünlüğünün korunabilmesi için dikkatli izleme ve bakım gerektirir. SSB uygulamasının başarılı olabilmesi için deneyimli ve yetkin işçilere ihtiyaç vardır. SSB'nin yerleştirilmesi ve sıkıştırılması için gerekli olan hassas teknikler, her zaman kolayca bulunamayan nitelikli bir iş gücünü gerektirir ve bu da lojistik zorluklar oluşturabilir. SSB ile pürüzsüz bir yüzey elde etmek oldukça zordur. Sıkıştırma işlemi, yapısal dayanıklılığı sağlarken, genellikle projelerin estetik veya fonksiyonel gereksinimlerini karşılamayan pürüzlü bir doku oluşturur. SSB genellikle maliyet etkin bir çözüm olarak kabul edilse de, belirli koşullar bu yöntemi daha pahalı hale getirebilir. Uygun agrega malzemelerinin sınırlı bulunabilirliği, düşük kaliteli temel kayası veya aşırı oturma riskine neden olabilecek temel koşulları gibi faktörler, maliyetleri önemli ölçüde artırabilir. Bu sınırlamalar, SSB'nin farklı jeolojik ve çevresel ortamlarda uygulanabilirliğini kısıtlar. Özetle, SSB çeşitli avantajlar sunarken, uygulama esnasında karşılaşılan bazı dezavantajlar da mevcuttur. Çatlak oluşumu eğilimi, nitelikli iş gücü gereksinimi, yüzey düzgünlüğünün sağlanmasındaki zorluklar ve bazı çevrelerde uygun olmama gibi dezavantajlar, SSB projelerinin planlanması ve uygulanması sırasında dikkatle ele alınmalıdır.

3.1. SSB ile Geleneksel Beton Yol Arasındaki Temel Farklılıklar

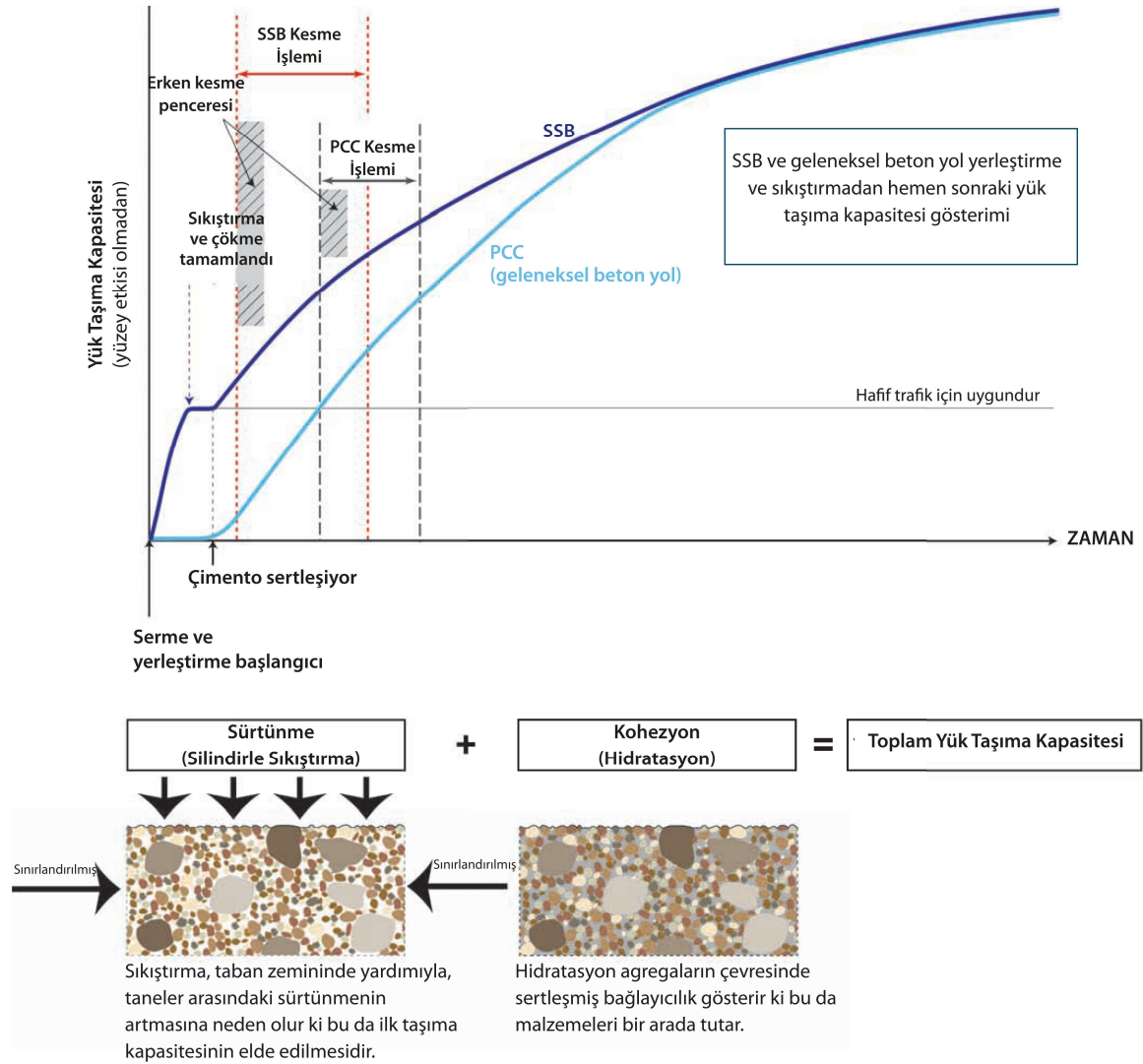
SSB ve geleneksel beton yollar arasında belirgin farklar bulunmaktadır. SSB karışımları, geleneksel betona göre daha az çimento, iri agregaya ve su içermekte olup, daha fazla ince taneli agregaya sahiptir (Şekil 3.2). Bu durum Şekil 3.3’de görülen her iki kaplamaya ait numune kesitlerinde de görülmektedir. Geleneksel betonla karşılaştırıldığında, SSB’de ince taneli agregalar daha sıkı bir şekilde bağlanmıştır. Geleneksel beton yollar, daha yüksek su ve çimento oranlarına sahipken, SSB karışımları daha kuru ve serttir, bu da işlenebilirlik ve serme işlemlerinde farklılık oluşturur. Geleneksel beton yollar plastik ve akıcı bir karışım sunarken, SSB yollar yoğun ve sert bir yapıdadır. Serme ve yerleştirme süreçleri de farklıdır; SSB yollar daha kalın tabakalar halinde serilir ve kalıp kullanılmaz. Sıkıştırma, çatlak kontrolü ve yüzey bitirme yöntemleri de iki yol tipi arasında çeşitlilik gösterir. Her iki yol tipinde de uygun hidratasyon ve kür işlemleri, yolun dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması için kritik öneme sahiptir. SSB yollarında ince tanelerin daha sıkı bir şekilde birleşmesini ve başlangıçta yüksek sürtünme ile yolun taşıma kapasitesinin artmasını sağlar. Hem geleneksel hem de SSB yolları, oturma ve hidratasyon süreçlerini içerir. Geleneksel betonda oturma vibratörlü makinelerle sağlanırken, SSB yollarında silindir veya tekerlekli sıkıştırma makineleri kullanılır. Şekilde 3.4’de gösterildiği gibi SSB, serimden hemen sonra hafif araç trafiğini taşıyabilirken, geleneksel beton hidratasyon başlayıncaya kadar bu kapasiteye sahip değildir. Ancak, her iki yol türü de uygun beton mukavemeti elde edilinceye kadar ağır yüke maruz bırakılmamalıdır. Geleneksel beton kaplamalar ile SSB kaplamaların arasındaki karşılaştırmayı ve temel farklılıkların özetlenmiş hali Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2: SSB ve geleneksel betonların tipik malzeme oranı karşılaştırmaları



Şekil 3.3: Porland çimentolu beton ve SSB'ye ait kesitler(Harrington vd., 2010)



Şekil 3.4: SSB ve geleneksel betonun erken dönem dayanım kapasiteleri (Harrington vd., 2010)

Tablo 3.1: Geleneksel beton kaplamalar ile SSB kaplamaların arasındaki temel farklar

Yol Tipi	Geleneksel Beton Yollar	SSB Yollar
Genel Uygulamalar ve Malzemeler	İri ve ince agrega, toplam hacmin %60-70'ini oluşturur. Su-çimento oranı 0.4-0.45'tir. Şekil 8'de, geleneksel beton ve SSB yolların malzeme oranları karşılaştırılmıştır.	İyi derecelendirilmiş iri ve ince agregalar, SSB beton karışımının %75-80'ini oluşturur. Karışım, geleneksel betondan daha kurudur ve daha az su ve çimento içerir.
Serme ve Yerleştirme	Karışım, serici makinelerle dağıtılıp, düzeltilir ve vibrasyonla sıkıştırılır.	Ağır sericilerle yol güzergahına dökülür ve serilir. Kalıplara ihtiyaç duyulmaz. SSB, minimum 15.2-20.3 cm ve maksimum 25.4 cm kalınlıkta serilir.
İşlenebilirlik	Karışım, sericilerin şekil verebilmesi için yeterince plastik ve akıcıdır, ancak makineden çıktıktan sonra şeklini koruyacak kadar serttir (5.1 cm slump).	Karışım yoğun gradasyona sahiptir, kuru ve serttir (sıfır slump), bu nedenle geleneksel beton makineleri ile şekil vermek zordur.
Sıkıştırma ve Hava Boşluklarının Uzaklaştırılması	İç ve dış vibratörler ile hava çıkarılır, su yüzeye çıkar.	Sıkıştırma genellikle karışımın ardından 60 dakika içinde silindir makinelerle yapılır.
Bitirme (Pürüzlendirme)	İlk oturma tamamlanmadan işlemler sonlandırılır ve mekanik olarak pürüzlendirilir.	Asfalt kaplamadaki gibi pürüzlü bir yüzey elde edilir. Elmas pürüzlendirme de kullanılabilir.
Hidratasyon	Beton karışımlarının uygun hidratasyonu, yolların uzun ömürlü olması için önemlidir. Kür edilmesi zorunludur.	Beton karışımlarının uygun hidratasyonu, yolların uzun ömürlü olması için önemlidir. Kür edilmesi zorunludur.
Kür	İş biter bitmez başlanmalı, su-çimento hidratasyonu kontrol altına alınmalı.	Sıkıştırma makinesinden hemen sonra tam kür sağlanmalı, su-çimento hidratasyonu kontrol altına alınmalıdır.
Çatlak, Yük Transferi ve Güçlendirme	Derz kesimiyle çatlaklar kontrol edilir, dowel ve tie barlarla yük transferi sağlanır.	Derz kesimi yaygın değildir, sık çatlaklar oluşur ve yük transferi agrega kenetlenmesiyle sağlanır.

3.2. SSB Kaplamaların Kullanım Alanları

1970'lerde ABD ve Kanada'da kullanılmaya başlandığından beri, SSB kaplamalar zorlu çevresel koşullardaki kaplama projelerinde farklı tekerlek yüklerini içeren trafik için kullanılmış ve ağır tekerlek yükleri altında üstün performans göstermiştir. SSB genellikle, ağır hizmet kaplamalarının gerekli olduğu tomruk dağıtım merkezleri, çok amaçlı terminaller, lojistik depoları ve diğer endüstriyel alanlarda tercih edilmektedir. Ancak, son dönemlerde birçok karayolu ve cadde uygulamasında düşük maliyetli kaplama tasarımı için SSB kullanımında belirgin bir artış yaşanmıştır.

3.2.1 Yüksek Hızlı Karayollarında Çok Katmanlı Üstyapı Sistemleri

Otoyol hızlarında trafik taşıyan yollar için SSB, daha iyi sürüş konforu sağlamak amacıyla ince bir asfalt kaplama tabakası altında temel olarak kullanılır. Bir diğer seçenek ise, SSB'nin geleneksel beton kaplama altında kullanılmasıdır. Bu durumda, silindire sıkıştırılmış beton tabakası mükemmel bir inşaat platformu sağlar ve en üstteki beton kaplama kalınlığının azaltılmasına olanak tanır. İki beton tabaka arasına, ayrı katman hareketini sağlamak ve bir kesme düzlemi oluşturarak tabandan beton kaplama yüzeyine yansıyan çatlakları önlemeye yardımcı olmak için bir ayırma tabakası gereklidir. Ayırma tabakası, bir asfalt tabakası veya geotekstil tabakası olabilir. SSB temel tabakası, geleneksel beton yolların kalınlığını azaltarak çok katmanlı yol sistemlerinin, karayolları, havaalanları ve ağır sanayi uygulamalarında maliyet etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Ayrıca, bu sistemler tam kesit yollar gibi uzun ömürlü performans sunar. Geleneksel beton kaplama altında kullanıldığında SSB tabakasında genellikle derz kesilmez. SSB temel tabakası, çatlak boşluklarını azaltmak veya yük transferini iyileştirmek amacıyla kesildiğinde, enine derzler 20 cm'den daha ince kaplamalarda 4,6 ila 6,1 metre aralığında olabilir. Ancak, 20 cm'den kalın kaplamalarda, derzler kaplama kalınlığının 3-4 katı kadar uzaklıkta olabilir. Çatlak aralığını en aza indirmek ve yük transferini iyileştirmek için kesme işlemi yapılırsa, enine derzler, 20 cm'den daha az kalınlıkta olan kaplamalar için 4.5-6.0 m aralıklarla olabilirken, 20 cm veya daha büyük kaplamalarda, kaplama kalınlığına bağlı olarak 6.0 ila 9.0 m olabilir. Boyuna derzler 6.0 ila 7.5 m aralıklarla yerleştirilmelidir (Gáspár ve Bencze, 2020).

3.2.2 Ana Yollar (Caddeler) ve Yerel Yollar (Sokaklar)

Ana yollar inşa edilirken trafik her zaman kritik bir faktördür. Trafik sınırlamaları ve esnek üstyapıların uygulanması için gereken süre göz önüne alındığında, bazı kurumlar ana yol projelerinde SSB üstyapıyı tercih etmektedir. SSB üstyapıları, proje ve kullanıcı maliyetlerini azaltarak hızlı bir şekilde inşa edilebilir. SSB kaplamalar proje ve kullanıcı masraflarını düşürerek hızlıca inşa edilebilirler. İşletme hızlarının yüksek olduğu yoğun trafikli caddelerde, elmasla pürüzlendirme veya SSB tabakası üzerine ince bir asfalt yüzey 5 ila 8 cm gibi yüzey iyileştirmeleri yapılabilmektedir. İnşaat hızı, ekonomi ve erken trafiğe açılma, sokaklar ve yerel yollar için SSB kullanmanın ana nedenleridir. Yüzey iyileştirmeleri, beton yol ömrünü tamamlanmaya yaklaştığında uygulanabilmektedir. Yeni

yerleşim alanları için saha çalışmaları ve inşaat sırasında güçlü bir çalışma platformu sağlar. Trafik hızları 50 km/sa'in üzerinde olduğunda, yüzey düzgünlüğü önemlidir. Bu nedenle, yüksek yoğunluklu serim makinesi ve/veya elmas taşlama uygulanmalıdır. SSB'nin üzerine ince bir asfalt kaplama tabakası yerleştirilmesi bir başka seçenektir. Yakınlardaki iş yerlerine hizmet vermek için inşaatın sonraki 24 saat içinde SSB kaplamalar hafif taşıt trafiğine açılabilir. Estetik açıdan veya çatlak yerlerini başlatmak için derz kesimi gerçekleştirilebilir.

3.2.3 Genişletme ve Banketler

Genişletilmiş yollar, yeni şerit ve kenar kayma gereksinimlerini karşılamak için en sık tercih edilen yöntemdir. Genellikle, zemin ve temel kalitesinin düşük olduğu bölgelerde yol genişletmesi yapılır. SSB'nin dayanıklılığı ve hızlı inşa edilme özelliği, bu malzemeyi yol genişletme projeleri için ideal bir seçenek haline getirir. SSB, karayolu trafiği için asfalt veya beton ile kaplanmış sağlam bir temel sunar ve uzun ömürlü performansı ile düşük bakım gerektirir. Banketlerdeki bozulmuş kaplama da SSB ile değiştirilebilir. Derz kesilmesi genellikle genişletme ve banketler için gerekli değildir.

3.2.3 Diğer Uygulama Alanları

- Havaalanları: Havaalanlarındaki bakım alanları, otoparklar ve kar depolama bölgelerinde sıklıkla kaplanmamış SSB yollar tercih edilmektedir. Bu kaplamalar, kar fırtınaları sırasında ağır kar temizleme işlerine ve yoğun kamyon trafiğine dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, SSB kar erimesi sonucu oluşan doygun koşullarda deforme olmaz. SSB tabanlı ince serilmiş asfalt veya bağlantısız beton kompozit kesitler, pistler, taksi yolları ve apronlarda kullanılır. Ancak, SSB kaplamalar, ilk iki yılda yüzeydeki gevşek agregaların kayması riski nedeniyle uçak trafiği için önerilmemektedir. Daha düşük hızdaki trafik için, park alanları ve bakım ekipman alanları genellikle yüzey iyileştirmesi veya pürüzsüzlük gerektirmez. Öte yandan, apronlar, taksi yolları ve pistler genellikle asfalt veya beton kaplama ile yüzey iyileştirmesi gerektirir.
- Limanlar, Çok Amaçlı Tesisler ve Ağır Sanayi Tesisleri: Limanlar ve ağır sanayi tesisleri, inşaat sürecinde karşılaşılabilecek pek çok zorluk nedeniyle geniş ve açık alanlar olarak bilinir. Bu özellikler, SSB'yi bu tür projeler için mükemmel bir

seçenek haline getirir. Limanlar ve ağır sanayi alanlarında kullanılan kaplamaların, güçlü ve dayanıklı olması gerekir, çünkü konteyner taşıma ekipmanları genellikle 30 ila 60 kip veya daha fazla tekerlek yüküne sahip olabilir. Eğer gerekli kaplama kalınlığı 25.4 cm'yi aşarsa, genellikle iki platform kullanımı gereklidir.

— Hafif Sanayi Alanları:

— Ağır sanayi tesislerine benzer şekilde, depolama alanları ve otomobil üretim tesisleri gibi hafif sanayi bölgeleri de geniş ve kesintisiz alanlar sunar, bu da SSB'yi bu tür projeler için uygun kılar. Bu alanlarda trafik hızı genellikle 48 km/saat (30 mph) civarındadır, bu yüzden yüzey iyileştirmeleri genellikle gerekmez. Ayrıca, araç yükleme limanlar ve ağır hizmet tesislerine kıyasla daha düşüktür. SSB'nin bir diğer kullanım alanı ise sanayi siteleri içerisindeki geçiş yollarıdır.

— Toprak Dağıtım ve Depolama Alanları: SSB, ilk olarak 1970'lerin ortasında Kanada'daki kereste işleme tesislerinde kullanılmaya başlandı. Bu tür projelerde, yüksek dayanıklılığa sahip ve uzun ömürlü yollar gerekmektedir. Yüzey görünümü, pürüzlülük ve konforlu sürüş gibi faktörler genellikle ön planda olmadığından, bu uygulamalarda daha büyük agregalar tercih edilebilir. Ayrıca, birçok temel uygulamada, SSB'lerin yerleştirilmesi ve sıkıştırılması için genellikle greyder ve dozer gibi iş makineleri kullanılmaktadır.

3.3. SSB Kaplamalardan Beklenen Performans Özellikleri

SSB yollarının performansını yapısal ve işlevsel açıdan değerlendirmek gerekmektedir. İşlevsel performans özelliklerine (güvenlik ve sürüş konforu) dair referansların çoğu, yol yüzeyinin özellikleriyle bağlantılıdır. Bu yüzey özellikleri, yüzey durumu (bozulmalar), geometrik düzgünlük ve makro ve mikro doku ile ilişkili olan kayma direncidir. Trafik yükleri ve çevresel koşullara karşı dayanım ve yük aktarımından oluşan yapısal performans özellikleri ise basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, yorulma dayanımı, aderans mukavemeti, geçirimsizlik, büzülme ve donma-çözülme dayanımını içermektedir. SSB kaplamaların yapısal performansı da sonuçta yüzey özelliklerini etkilemektedir. Yüzey bozulmaları, derz durumu, aşınma veya dağılma, derz dolgu malzemesi hasarı (eğer derzli ise), yama yapılmış alanlar ve kırılmış bölgeleri içerebilir. Genel olarak, bu tür bozulmalar çoğunlukla dayanım eksikliği ve donma/çözülme zararlarından kaynaklanır (Gáspár ve Bencze, 2020).

3.3.1 Geometrik Düzgünlük ve Pürüzlülük

Geometrik düzgünlük ve pürüzlülük, SSB'nin işlevsel performansını etkileyen faktörlerdir. Düzgünlük, yol yüzeyinin teorik düzlemde sapmasını tanımlar ve yolda seyahat eden bir araç yolcusunun hissettiği sürüş hissini bir tanımlayıcısıdır. Düzgünlük eksikliği, öncelikle inşaat prosedürünün bir fonksiyonudur ve SSB yollarının düşük trafik ve düşük hız uygulamalarıyla sınırlı olmasının başlıca nedeni olmuştur. Bazı araştırmalarda, SSB yollarının düzgünlüğünün kabul edilemez olarak değerlendirilmiştir. Fakat, elde edilen deneyimlerle birlikte düzgünlüğün azaltılabileceği ve SSB yollarının yüksek hızlı aşınma yüzeyleri için kabul edilebilir olabileceği öne sürülmüştür.

3.3.2 Kayma-Sürtünme Direnci

Bu parametre, özellikle yüksek tasarım hızına sahip yollarda önemli bir endişe kaynağıdır. Bu direncin yetersiz olması, yol güvenliğini olumsuz etkileyebilir. SSB'nin ilk kullanımları ağır hizmet endüstriyel uygulamaları içerdiğinden, hızlar genellikle düşük olup kayma direnci birincil bir öncelik değildi. SSB'nin kayma direnci testleri hem ABD'de hem de Avustralya'da yapılmış ve zayıf ile orta düzeyde test sonuçları elde edilmiştir (ACI, 2001). Düşük kayma-sürtünme özellikleri, SSB yüzeyinin makro ve mikro dokusuna bağlanmıştır. Geleneksel beton yüzeylerde, yüzeyin pürüzlendirme aşaması ile yüzey doku oluşturulur. Bu yüzey işlemleri, yağış sırasında suyun yüzeyden kaçmasına olanak tanıyarak araçların kızıklama riskini önler. Ancak, SSB yollarında genellikle yüzey işlemleri uygulanmaz ve yüzey dokusunun karışım oranlarına ve sıkıştırma yöntemlerine büyük ölçüde bağlı olduğu düşünülmektedir. Yüksek hızlı yollarda ise kayma-sürtünme için uygun pürüzlülükte bir yüzey oluşturmak için elmas taşıma kullanılabilir veya SSB'nin üzerine yoğun dereceli bir SBK karışımı gibi ek bir aşınma tabakası yerleştirilebilir.

SSB kaplamalarının mühendislik özellikleri, geleneksel beton kaplamalarla benzerlik gösterir, ancak farklı karışım oranları ve inşaat yöntemleri uygulanır. SSB kaplamaların fizik ve mekanik özelliklerini tanımlayan veriler, tam ölçekli test kesitinin yansıması kaplama projelerinde karışım tasarım aşamasında ve kontrol amaçlı alınan numuneler üzerinde laboratuvarında yapılan testlere dayalıdır. SSB'nin dayanım özellikleri, kullanılan çimentonun

miktarına, su/çimento oranına, agreganın kalitesine ve betonun sıkışma derecesine bağlıdır. Bu kaplamalar, genellikle geleneksel betonun basınç ve eğilme dayanımıyla benzer performans sergiler. Bu nedenle, karışım tasarımının, gerekli dayanım kriterlerini karşılayacak şekilde titizlikle analiz edilmesi gereklidir.

3.3.3 Basınç ve Eğilme Dayanımı

SSB'nin basınç dayanımı, genellikle 28 ile 41 MPa aralığındaki geleneksel betonlarla karşılaştırılır. SSB karışımlarında kullanılan iri agregalar, betonun basınç dayanımını artırmada önemli rol oynar. Düşük su/çimento oranına sahip SSB karışımları, düşük poroziteye sahip çimento matrisleri oluşturarak yüksek basınç dayanımına katkıda bulunur. Her karışım, maksimum kuru yoğunluğu elde edebilmek için belirli bir optimum nem içeriğine sahiptir ve bu yoğunluk genellikle en yüksek dayanımı sağlar.

Eğilme dayanımı, beton karışımının basınç dayanımı ve yoğunluğuyla doğrudan ilişkilidir. Uygun şekilde inşa edilen SSB kaplamaları, yorulma çatlaklarının gelişimini minimize edebilir. Düşük su/çimento oranı nedeniyle, karışımın yoğunluğu ve agregalar arasındaki bağların dayanımı yüksektir. Bu nedenle, SSB'nin eğilme dayanımı genellikle 3,5 ila 7 MPa arasında yüksek bir değer gösterir. Laboratuvar ortamında kırış numunelerinin üretilmesi ve kaplama alanlarından kesilmesi zor olduğu için, SSB'nin eğilme dayanımı genellikle yapılan çalışmalarla belirlenen basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişkiye dayanarak değerlendirilir.

Elastisite modülü, malzemenin basınca verdiği tepkinin tersinir elastik deformasyon altındaki davranışını yansıtır ve uygulanan gerilme ile basınç arasındaki oranın ölçüsüdür. Tam ölçekli test kesitlerinden alınan SSB karot numuneleri üzerinde yapılan araştırmalar, benzer çimento içeriğine sahip karışımlarda SSB'nin elastisite modülünün genellikle geleneksel betonla eşdeğer veya biraz daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

3.3.4 Yorulma Dayanımı

Yorulma bozulmaları, malzemenin tekrarlanan basınçlara maruz kalması sonucu meydana gelir. Tek bir yükün oluşturduğu basınç malzemenin dayanımını aştığında bozulma oluşmaz; ancak, bu yükün sürekli tekrarı, malzeme üzerinde aşırı yüklemeye yol açarak

yorulma bozulmalarına neden olur. SSB kaplamalarında kritik basıncın eğilme etkisi nedeniyle, eğilme basıncına bağlı yorulma, kalınlık tasarımında dikkate alınır. "Basıncı oranı", eğilme basıncının eğilme dayanımına oranı, yorulma ilişkilerinde kullanılır. Örneğin, 400 psi (2,76 MPa) lastik yükü eğilme basıncına neden olurken, SSB'nin eğilme dayanımı 650 psi (4,48 MPa) değerindedir. SSB'nin yorulma davranışını anlamak için sınırlı sayıda test yapılmıştır. Dört farklı SSB karışımından alınan kirişler üzerinde gerçekleştirilen yorulma testleri, SSB'nin yorulma performansının geleneksel betonla benzer olduğunu göstermiştir (Tayabji ve Okamoto, 1987).

3.3.5 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Karasal iklimlerde, SSB kaplamalar genellikle donma-çözülme (F-T) döngüsünün neden olduğu iki tür hasara maruz kalır: içsel çatlaklar ve yüzey soyulması. Bu hasarlar aniden ortaya çıkabilir, ancak aslında birbirinden bağımsız ve farklı olgulardır. SSB betonunda belirgin bir nem bulunuyorsa, F-T döngüsü elastisitenin dinamik modülünü düşürüp malzemenin genişmesine neden olarak içsel çatlaklar oluşturabilir. Ayrıca, nemli beton yüzeylerinde F-T döngüsü sırasında yüzey soyulması görülebilir. Bu süreç, buz çözücü tuzların varlığında daha da şiddetlenir (Marchand vd., 1992). Bu nedenlerle, SSB karışımlarının F-T döngüsünün her iki tür hasarına karşı dirençli olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Arazi performans incelemeleri, SSB'nin sert hava koşullarında mükemmel bir performans sergilediğini göstermektedir. ABD ve Kanada'daki araştırmalar, SSB karışımlarının, hava ilavesi olup olmadığına bakılmaksızın, otuz yılı aşkın süredir başarılı bir şekilde kullanıldığını ortaya koymuştur. Yapılan kapsamlı bir çalışmada, çeşitli iklim koşullarında ve 3 ila 20 yıl yaşındaki SSB kaplamalarının başarılı performans gösterdiği bulunmuştur. Çalışmada, karışımın yeterli çimento içeriği, sert agregalar, uygun karıştırma yöntemleri ve süreleri, yeterli sıkıştırma ve uygun kuruma koşullarına sahip olması durumunda, hava ilavesiz SSB kaplamalarının F-T ortamlarında güvenilir ve uzun ömürlü performans sağladığı belirtilmiştir (Piggott, 1999).

SSB'nin donma-çözülme zararlarına karşı hassas olduğuna dair çok az kanıt bulunmasına rağmen, çoğu SSB'nin hava sürükleyici ajanlar (Air-Entraining Agent-AEA) içermemesi bu

konuda endişe oluşturmaktadır. Bir çalışmada, AEA içermeyen SSB karışımlarının AEA içerenlere nazaran dona karşı daha hassas olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, laboratuvarda SSB karışımlarının başarıyla hava sürüklenirilebileceği belirlenmiştir (ACI, 2001). AEA kullanılmayan SSB karışımların, 300 adet F-T döngüsüne, herhangi bir şekil değiştirme oluşmadan dayanabildiğini belirtmişlerdir. Bu bulgu, hava boşluklarının çoğunun sıkıştırma işlemi sonucu oluştuğunu öne sürmektedir (Pigeon ve Marchand, 1993).

İstenilen düzeyde bir sabit hava boşluk sistemi sağlamak için, farklı AEA katkı maddeleri, çeşitli karıştırma enerjileri ve süreleri kullanmak gereklidir. Bu nedenle, SSB üretiminde AEA katkıları ve karıştırıcı ile sıkıştırıcı tiplerinin seçimi önemlidir. Önceki tecrübeler, karıştırıcı bıçaklarının bağımsız döndüğü “pan mikserlerin” diğer mikser tiplerinden daha fazla yoğurma enerjisi sağladığı için hava girişini kolaylaştırdığını göstermiştir. Ayrıca, SSB'de hava sürükleyici kullanımı, daha katı karışımlardaki düşük su ve çimento içeriği nedeniyle geleneksel betona göre daha yüksek katkı dozajları gerektirir. Bu nedenle, uygun katkı maddesinin seçilmesi ve laboratuvar ortamında doğrulanması önemlidir.

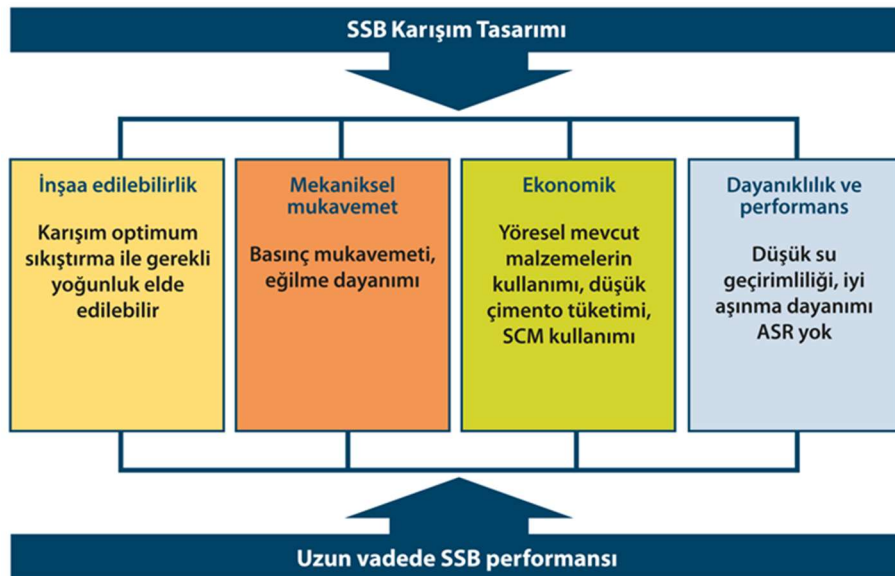
3.3.6 Diğer Özellikler

- *Yük Aktarımı:* SSB'nin performansında dikkate alınması gereken bir diğer önemli faktördür. SSB yollarında yük aktarım elemanları kullanılmadığından, tüm yük aktarımı karışımdaki agrega kilidinden elde edilir. Bu nedenle, çatlak genişlikleri, karışımın yük aktarım kapasitesini kritik şekilde etkiler ve mevsimsel olarak değişmesi beklenir. Ortalama çatlak genişlikleri 1,17 ile 1,52 mm arasında bildirilmiştir (ACI, 2001). Bazı kaynaklar, çatlakların döşemeden sonraki ilk birkaç gün içinde gelişmesine rağmen, sıkı kaldığını ve performans sorunları oluşturmadığını belirtmiştir.
- *Büzülme:* SSB kaplamalarında hacim değişiklikleri genellikle kuruma büzülmesi nedeniyle meydana gelir. Ancak, SSB'nin düşük su içeriği nedeniyle, kuruma büzülmesiyle ilgili hacim değişiklikleri geleneksel beton karışımlarına göre daha azdır. Bu durum, çimento hamurunun düşük hacminin, SSB kaplamalarında daha az büzülme ve çatlak oluşumuna yol açmasını sağlar. Araştırmalar, sabit çimento miktarıyla birlikte iri agregaların artmasının, yüksek sınırlama nedeniyle kuruma büzülmesini azalttığını ortaya koymuştur (Pittman ve Ragan, 1998).

- *Geçirirnililik*: SSB'nin hidrolik geçirirgenliği genellikle, harç kalıbının gözenekliliği ve sıkıştırılmış SSB'deki boşluklar ile ilişkilidir. Bu nedenle, SSB'nin hidrolik geçirirgenliği, karışım oranı, uygulama yöntemi ve sıkıştırma derecesi gibi faktörlerle büyük ölçüde kontrol edilebilir. Sertleşmiş SSB'nin geçirirgenliği, geleneksel betonla benzer seviyelerde kalmaktadır.

3.4. SSB Karışım Tasarımı

Kaliteli bir SSB karışımı elde etmek için malzeme seçiminden ziyade, malzemelerin doğru oranlarda kullanımı büyük önem taşır. Karışımdaki malzeme oranlarının belirlenmesi, deneme yanılma yönteminden ziyade, sistematik ve bilimsel bir yaklaşımla yapılmalıdır. Ayrıca, bu oranlar, hedeflenen mühendislik özelliklerini, yapısal gereksinimleri ve ekonomik verimliliği de karşılamalıdır. şekil 3.5'te gösterilen diyagramda, SSB karışım tasarımında dikkate alınması gereken faktörler yer almaktadır. Dünya genelinde SSB için çeşitli karışım oranlama yöntemleri başarıyla uygulanmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin çeşitliliği standart bir prosedürün oluşumunu engellemiştir. Yine de en yaygın kullanılan yöntemler genellikle iki ana yaklaşımın farklı varyasyonlarından oluşur: zemin sıkıştırma yaklaşımı ve işlenebilirlik yaklaşımı. Genellikle yollar için zemin sıkıştırma testi, hidrolik yapılar (barajlar, dolu savaklar vb.) için beton kıvam testi ve optimal imento hamur hacim yöntemi uygulanmaktadır.



şekil 3.5: SSB karışım tasarımında göz önünde bulundurulan faktörler

Herhangi bir yaklaşım benimsenmemiş olsa da üretilecek SSB karışımı;

- Agregaların etrafını yeterince saran ve boşlukları dolduran bir matriks hacmini içermeli,
- Gerekli mukavemet ve elastisiteye sahip olmalı,
- Yeterli sıkışmayı sağlayabilecek işlenebilirlikte olmalı,
- Maruz kalacağı çevresel koşullar karşı dirençli olmalıdır.

3.4.1 Malzeme Seçimi

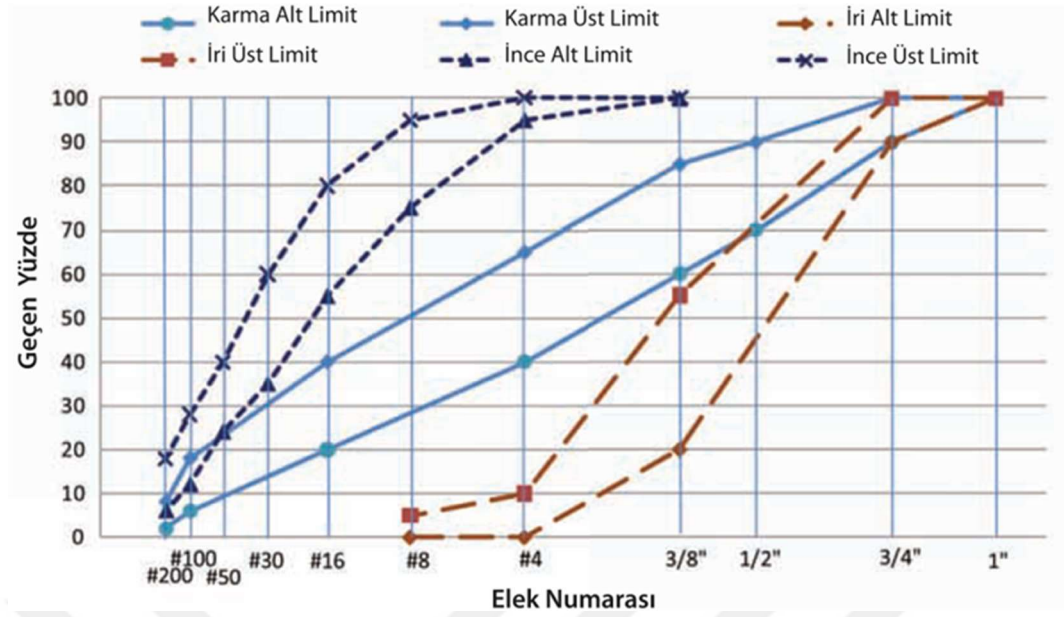
SSB kaplamalarda geleneksel betonla aynı malzemeler kullanılır. Temel kaba ve ince agregalar, çimentolu malzemeler (çimento, uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu, vb.) ve su kullanılır, ancak bunlar geleneksel beton kaplamalara yönelik karışımlarla karşılaştırıldığında farklı oranlarda kullanılır. Her beton karışımında olduğu gibi malzeme seçimi çok önemlidir. İyi tasarlanmış ve uygun performansa sahip bir SSB karışımı sağlamak için, karışım bileşenlerinin bilgisi ve inşaat spesifikasyonları ve spesifik uygulamalara yönelik gereksinimler konusundaki deneyim önemlidir. SSB karışım oranlaması, geleneksel beton karışımı oranlaması ile aynı değildir. Ancak SSB'nin bileşenlerinde geleneksel beton karışımlarıyla karşılaştırıldığında beş temel farklılık vardır (ACI, 2001).

- SSB genellikle havayla sürüklenmez,
- SSB'nin su içeriği daha düşüktür,
- SSB'nin hamur/macun içeriği daha düşüktür,
- SSB, uygun sıkıştırmayı sağlamak için daha fazla ince agregaya gerektirir,
- SSB agregaları 19 mm nominal maksimum agregaya boyutunu aşmaz.

3.4.1.1 Agregalar

SSB karışımları, optimum yapışma miktarını sağlamak, segregasyon riskini azaltmak, boşluk oranını en aza indirmek ve yoğun ve düzgün bir yüzey elde etmek için iyi derecelenmiş agregalarla hazırlanmalıdır. SSB karışımları geleneksel betonlara göre daha kaliteli agregaya kullanımını gerektirmektedir. Kullanılan agregaların, ASTM C33 veya diğer onaylı standartlara uygun olması gerekir.

Agregalar, hacimce SSB karışımlarının %85'ine kadarını oluşturur. İşlenebilirlik, belirli yoğunluk, basınç ve eğilme dayanımları, termal özellikler, dayanıklılık ve uzun vadeli performans gibi istenilen özelliklerin elde edilmesinde etkili olurlar. Bu agregalar, geleneksel betonda kullanılanlarla aynı olabilir ancak aşınma direnci, alkali-silika reaksiyonu ve agregaların dayanıklılığı gibi hususlar daha önemlidir. Agregalar geleneksel betonla aynı olabilse de gradasyon gereksinimleri farklıdır. Agregada iskeleti, silindirler altında sıkışmayı sağlarken formunu korumalı ve ayrışmamalıdır. Agregada gradasyonu, agregada özellikleri ile birlikte ayrışma potansiyelini azaltabilir ve mukavemet ve dayanıklılığı artırabilir. Yerel mevcudiyete, yerel uygulamalara ve spesifikasyonlara bağlı olarak, farklı karışım uygulamalarıyla kırılmış veya kırılmamış agregalar kullanılabilir. Hem iri hem de ince agregalar sert ve dayanıklı olmalıdır. SSB gradasyonları tipik olarak yoğun ve iyi derecelendirilmiştir ve karışım için gerekli agregada kilitlenmesini sağlar. Bu genellikle ince ve iri agregaların karışımını gerektirir ve ince fraksiyon, geleneksel kaplama betonuna göre daha yüksektir. Ara agregalar (iri ve ince agregalar arasındaki boyut dağılımına sahip olanlar) da SSB'ye özgü yoğun, iyi derecelendirilmiş gradasyonu oluşturmak için kullanılabilir. Şekil 3.6'da ince ve iri agregada için limit gradasyon eğrilerinin yansıması, önerilen karıştırılmış agregada eğrisi gösterilmektedir. İnce ve iri agregalar, karışımın istenilen gradasyonunu elde edebilmek için uygun oranlarda karıştırılabilir; bu oranlar, eğri üzerinde yer alan ürünlerin karışımında doğru dağılımını sağlar. Toplam agregada ince fraksiyonları tipik olarak %2-8 aralığındadır. İri agregalar ASTM C33/AASHTO M6/M80 standartlarına uygun olmalı ve genellikle yüzeyi işlenmemiş SSB kaplamaları için nominal maksimum agregada boyutu (NMA) 3/4 inç (19 mm) olmalıdır. Eğer bir aşınma tabakası altında kullanılıyorsa veya yüzey kalitesi önemli değilse, daha yüksek bir NMA kullanılabilir. Küçük NMA iri agregalar, ayrışma potansiyelini azaltır, tutarlılığı artırır ve sürüş kalitesini iyileştirir, ancak aynı zamanda çimento tüketimini de artırabilir. Aşınma, sağlamlık, alkali-silika reaksiyonu, dayanıklılık indeksi ve termal genleşme katsayısı için ek testler gerektiğinde yapılmalıdır. İnce agregalar da ASTM C33/AASHTO M6/M80 standartlarına uygun olmalıdır.



Şekil 3.6: SSB agrega grupları için gradasyon eğrileri ve karışım karma gradasyonu

3.4.1.2 Bağlayıcı Malzemeler

SSB karışımında temel hidrolik çimento türleri, katkı çimentolar veya hidrolik çimento ve puzolan kombinasyonu kullanılabilir. Geleneksel beton gibi, SSB karışımlarında kullanılan malzemeler, sülfat saldırısına karşı kimyasal direnç, potansiyel alkali reaktivitesi ve aşınmaya karşı direnç dikkate alınarak seçilmelidir.

Tip I ve II çimentolar SSB kaplamalarda yaygın olarak kullanılır. Tip III, erken mukavemet kazanımı gerektiğinde kullanılabilir. Belirli topraklar yüksek sülfat direnci gerektirdiğinde Tip V'de kullanılabilir. Çimentolu malzemeler ASTM C150 veya ASTM C1157 gerekliliklerini karşılamalıdır.

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik katkı maddeleri, özellikle standart gradasyonlu beton karışımlarında ek ince malzeme sağlamak ve yeterli sıkıştırmayı elde etmek amacıyla kullanılabilir. Ancak bunlar ABD'de SSB karışımlarında yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Puzolanik malzemeler kullanıldığında, SSB karışımlarının işlenebilirliği artırılabilir, alkali-agrega reaksiyonları ve alkali-silika reaktivitesi riskleri azaltılabilir, sıkışma süresi uzatılabilir ve silis dumanı eklenirse donma-çözülme koşullarına karşı direnç sağlanabilir.

3.4.1.3 Kimyasal Katkılar

SSB karışımlarında kohezyonu artırmak amacıyla süper akışkanlaştırıcı, priz hızlandırıcı veya yavaşlatıcı, su azaltıcı gibi çeşitli kimyasal katkıları kullanılabilir. SSB'nin daha az su içerisi nedeniyle, bu karışımlar sıradan betonlara kıyasla daha fazla miktarda kimyasal katkı gerektirebilir. SSB karışımları çok kuru olduğundan, etkili olabilmesi için katkıların geleneksel betona göre daha yüksek miktarlarda eklenmesi gerekir. Herhangi bir katkının, taze ve sertleşmiş SSB karışımında kullanılmadan önce etkileri önceden test edilmelidir. SSB'de katkı kullanımlarında için ASTM C94'e dikkate alınmalıdır. SSB karışımlarında kimyasal katkının kullanımında, performans ve uyumluluğun sağlanması için uygun laboratuvar ve saha testlerinin yapılması önemlidir. Bu testler aynı zamanda geleneksel betondan farklı olan katkıları için uygun dozaj oranlarını da doğrulayacaktır.

Su azaltıcı ve geciktirici katkıları, SSB karışımlarının kohezyonunu artırabilir, sıkıştırmayı kolaylaştırabilir ve genellikle işlenebilirlik süresini 45-60 dakika kadar uzatabilir. SSB karışımının su ihtiyacını azaltmak veya ek sıkıştırma sağlamak, kullanılan agregaların türüne ve miktarına, özellikle 200 nolu (75 µm) elekten daha ince olanlara bağlıdır. Ekonomik nedenlerle bazı üreticiler su azaltıcı katkıları yerine çimento içeriğini artırmayı tercih edebilir; ancak bu, karışımın daha fazla büzülmesine neden olabilir. Geciktirici katkıları ise, hidrasyon sürecinin başlangıcını geciktirir veya yavaşlatır, böylece sıkışma süresini uzatır ve yan yana veya ardışık şeritler arasındaki bağları güçlendirir.

Süper akışkanlaştırıcılar, bazen kuru karışım beton santrallerinde karışım ve boşaltma sürelerini kısaltmak amacıyla kullanılır. Özellikle polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcılar, işlenebilirliği artırmak ve karıştırma süresini kısaltmak için tercih edilir, bu da üretim hızında önemli bir artış sağlar. Projeleri trafiğe daha hızlı açmak için, SSB'nin kür süresini hızlandırmak amacıyla hızlandırıcı katkıları kullanılabilir. Hava ilavesi yapılan katkıları, SSB'de yaygın olarak kullanılmaz çünkü yeterli donma-çözülme dayanımı hava ilavesi olmadan da elde edilebilir. Ayrıca, arazide hava ilaveli SSB üretiminin pratikliği henüz kesin olarak kanıtlanmamıştır.

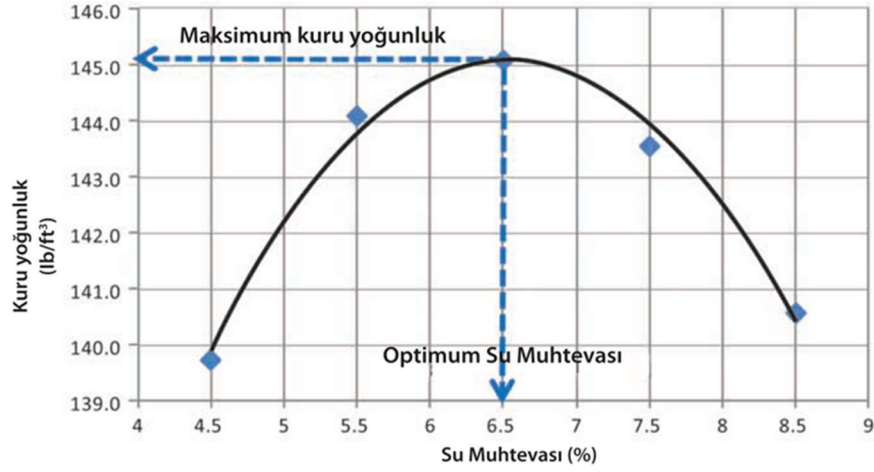
3.4.1.4 Su

Su içeriği, hem titreşimli silindirle sıkıştırılabilecek hem de çimentonun karışımında homojen dağılmasını olanak tanıyacak nemlilikte olmalıdır. SSB'deki kimyasal hidrasyon için gereken su, iki farklı kaynaktan temin edilmektedir. Birincisi agreganın içerdiği aşırı serbest su, ikincisi ise karıştırma sırasında plentte eklenen sudur. Bu, geleneksel kaplama betonuna benzerdir ve bu nedenle su kalitesinin ASTM C1602 gerekliliklerini karşılaması gerekir. Mümkünse karışım tasarımları sahaya özel su ile yapılmalı ve varsa sınırlamalar projenin başlarında not edilmelidir.

3.4.2 Karışım Tasarımı Yöntemleri

SSB karışım tasarım oranlarının belirlenmesi için kullanılan iki ana yaklaşım vardır. Birincisi, zemin sıkıştırma (Modifiye Proctor) testleri kullanılarak yapılan oranlamadır, ikincisi ise kıvam veya işlenebilirlik yaklaşımıdır ve kıvam testleri ile oranlama yapılır. En yaygın kullanılan SSB karışım tasarım yöntemi modifiye Proctor yöntemidir. Bu yöntemde, bir agrega yapısı ve çimento içeriği seçilir ve bir Proctor eğrisi oluşturmak için farklı nem içeriklerinde SSB örnekleri sıkıştırılır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi yoğunluk ve nem içeriğinin parabolik ilişkisine dayanarak, maksimum yoğunluğa karşılık gelen optimum nem içeriği seçilir (parabolün zirvesi). Bu karışım tasarımı bölümü, AASHTO T 180 veya ASTM D1557 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir. Optimum nem içeriği belirlendikten sonra, farklı çimento içeriklerinde SSB numuneleri hazırlanır. İstenen basınç dayanımını sağlayabilen minimum çimento içeriği tasarım için seçilir (Amer vd., 2004).

Değişen çimento içeriği için, basınç dayanım numuneleri vibratörlü tokmak (ASTM C1435) veya sarsma tablası metodu (ASTM C1176) ile uygun optimum su muhtevasında hazırlanır. Bu belirlenen su içeriğiyle hazırlanan numuneler, basınç mukavemeti testlerine tabi tutulur. Test sonuçları, her çimento içeriği için ilgili basınç mukavemetini gösteren bir eğri oluşturulmasına olanak sağlar; bu eğri, Şekil 3.8'deki grafikte gösterilmektedir. Tablo 3.2'de ABD'deki bazı projelerde kullanılan karışım tasarım değerleri görülmektedir.



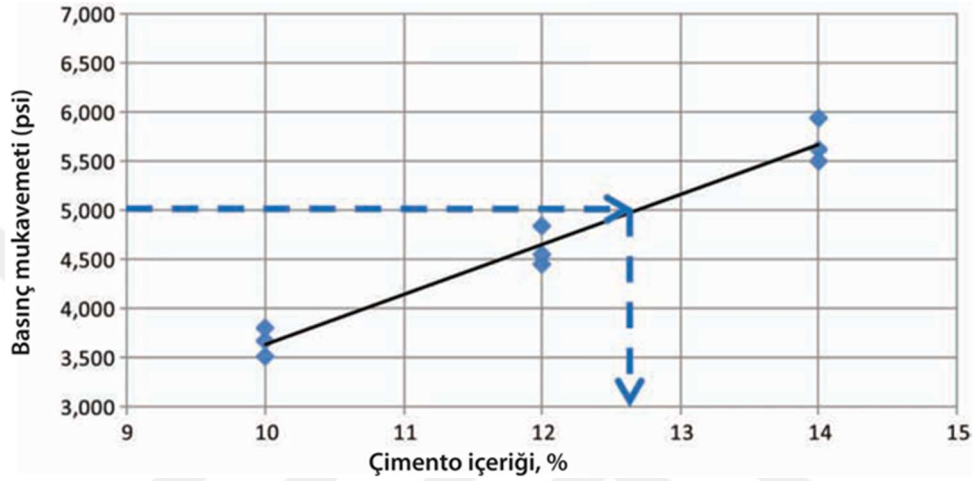
Şekil 3.7: Kuru yoğunluk-su muhtevası ilişkisi

Tablo 3.2: ABD’deki bazı projelere ait SSB karışım tasarımları

Referanslar/İnşaat Sahası			Tacoma limanı, WA Intermo dal alanı	CTL Karışım	Chattanooga, TN	Brownsville, TX	Güney Carolina	Atlanta, GA I285 Yol kenarı	Canada PCA RD135
Bağlayıcılar	Çimento	(kg/m³)	450	504	300	504	444	500	500 ₁
	Uçucu Kül	(kg/m³)	100	0	150	0	0	0	0
Agregalar	Maksimum agrega boyutu (in.)	(mm)	5/8	3/4	3/4	3/4	1	1/2	3/4
	İri agrega	(kg/m³)	1,700	1,378	2,110	1,287	1,759	1,650	2,117
	İnce agrega	(kg/m³)	1,700	2,106	1,657	1,762	1,658	1,650	1,349
	İnce taneler (No. 200 geçenler)	(%)	3-7	2	3.6	2	--	--	--
Su ₂		(kg/m³)	257	211	190	236	216	266	160
Katkılar	Su azaltıcı veya geciktiriciler	(kg)	--	--	18	--	--	0	41
	Hava sürükleyiciler	(kg)	--	--	0	--	--	0	41
Sıkıştırma parametreleri	Maksimum doymun yoğunluk	(kg/m³)	154.3	152	--	147.2	--	150.3	156.9
	Su/çimento oranı	--	0.47	0.42	0.42	0.47	0.49	0.53	0.32
	Agrega/çimento (ağırlık)	--	6.18	6.91	8.37	6.05	7.70	6.60	6.93
	İnce agrega/Toplam agrega	(%)	50.00	60.45	43.98	57.79	48.52	50.00	38.9
Güç	Basınç, 3-gün	(MPa)	1,810	5,460	5,090 ₃	3,046	3570	3866	--
	Basınç, 28-gün	(MPa)	6,050	7,900	6,100	4,946	5,220	5,157	8,368
	Eğilme, 3-gün	(MPa)	525	690	611 ₃	493	--	--	--
	Eğilme, 28-gün	(MPa)	770	900	702	638	--	--	--
	Oran 28-gün eğilme/basınç	(%)	11.39	11.39	--	12.90	--	--	--

Kıvam yaklaşımı ile karışım tasarım oranlarının belirlenmesinde, USACE tarafından benimsenmiş olup, Vebe masası olarak bilinen bir cihazın kullanımına dayanmaktadır. Vebe testi, gerekli dayanım seviyesinde optimum işlenebilirliği ölçer. Bu yöntemde, SSB kaplamanın performans parametreleri belirlenir ve ardından karışım oranları, çimento

hamuru: harç oranı dahil olmak üzere tablolar ve bir dizi hesaplama ile tahmin edilir. Deneme karışımı, karışım değerlendirme sürecini tamamlar. Bu değerlendirme, karışımın işlenebilirliğini, kıvamını ve pasta içeriğini değerlendirmek için bir titreşim masası ve ağırlıklı bir baskı kullanır. “Vebe zamanı”, baskının çevresinde bir pasta halkasının görünmesi için geçen süre olarak kaydedilir. 15 ila 20 saniyelik Vebe zamanları, makul derecede işlenebilir karışımları ifade eder (Amer vd., 2004; Harrington, 2010).



Şekil 3.8: Basınç dayanımı-çimento içeriği ilişkisi

Genel olarak, baraj inşaatında kullanılan SSB karışımlar, yol yapımında kullanılan SSB karışımlardan daha düşük Vebe zamanları sergiler. Yollarda kullanılan SSB karışımları genellikle 30 saniyeden daha uzun Vebe zamanlarına sahiptir, bu da nispeten sert bir karışımı gösterir.

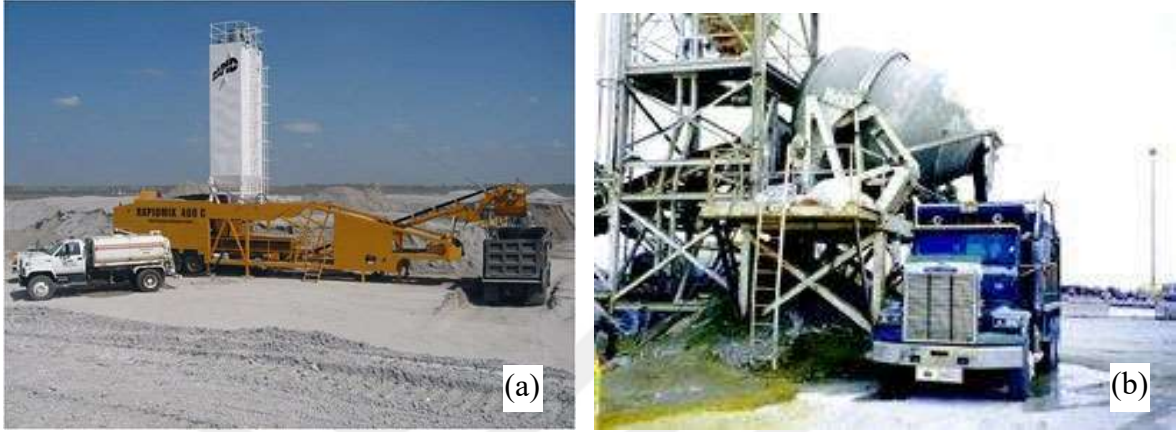
Proctor ve Vebe tasarım yöntemlerine ek olarak, katı süspansiyon modeli, optimal pasta hacmi yöntemi ve yoğurmalı sıkıştırma yöntemi de SSB tasarımı için düşünülmüştür. Katı süspansiyon modeli daha teorik bir yaklaşımdır ve karışımın kuru sıkıştırma yoğunluğunu optimize etmek için kuru katı bileşenlerin oranlanmasını içerir. Optimal pasta hacmi yöntemi genellikle büyük SSB yapıları için kullanılır ve SSB karışımlarının, agrega yapısı maksimum yoğunluğa ulaştığında boşlukları dolduracak kadar pasta içermesi gerektiği fikrine dayanır. Yoğurmalı sıkıştırma yöntemi, SSB yollarının asfalt yollarına benzer bir şekilde sıkıştırılması yaklaşımıyla düşünülmüştür ve benzer bir karışım tasarım yönteminin de faydalı olabileceği mantıklıdır. Asfalt yollar, vibrasyonlu ve statik çelik tamburlu silindirler kullanılarak sıkıştırılır ve bu silindirler, Proctor çekicinin darbe hareketinden biraz farklı olan bir yoğurma hareketi sağlar. Bu nedenle, Proctor yoğunluğu, inşaat sırasında elde

edilebilecek gerçek yoğunluğun en iyi temsili olmayabilir. Asfalt endüstrisinde benzer bir tutarsızlık, Marshall çekicinin darbe tarzı sıkıştırmasından laboratuvar sıkıştırmasının yoğurma yöntemine geçişe neden olmuştur. Yoğurmalı sıkıştırmasının, sahada sıkıştırma sırasında silindirlerin yoğurma hareketini daha doğru bir şekilde taklit ettiği düşünülmüştür. Laboratuvar numuneleri üretme yöntemlerinde SSB'nin bir dezavantajı, laboratuvar numunelerinin gerçek saha performansını tutarlı bir şekilde temsil edememesi veya tahmin edememesidir. Alabama'da yapılan bir çalışmada, yoğurmalı kompaktör kullanılarak laboratuvarda SSB test numuneleri üretilmiş ve yoğurmalı kompaktörün tutarlı yoğunluk ve dayanımlara sahip numuneler üretebildiği belirlenmiştir (Amer vd., 2003). Yaklaşık 60 dönüşün, saha özelliklerine en yakın olan laboratuvar SSB numunelerini üreteceği tahmin edilmiştir. Daha sonra, yoğurmalı kompaktör kullanarak SSB karışım tasarımı prosedürünü araştırmak için ek çalışmalar yapılmıştır (Amer vd., 2004). Yoğurmalı kompaktörün laboratuvarda tutarlı SSB numuneleri üretebildiği tekrar gösterilmiş ve Proctor testi ile teorik maksimum yoğunluğu arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Teorik maksimum yoğunluğu, karışımdan tüm hava boşluklarını çıkarmanın mümkün olması durumunda SSB bileşen malzemelerinin yoğunluğu olarak tanımlanır ve Proctor yoğunluğunun yaklaşık %106'sına karşılık gelir. Ayrıca, yoğurmalı kompaktörün tutarlı numuneler ürettiği için, SSB tasarım prosedürlerinin, dayanım yerine elde edilen numune yoğunluklarına dayalı malzeme oranlarını seçmek üzere ayarlanabileceği önerilmiştir. Yoğunluk ve dayanım ilişkileri, yoğunlukta %1 ila %2'lik bir artışın, yaklaşık %10 ila %17'lik bir dayanım artışına neden olabileceğini göstermiştir.

3.5. SSB Kaplama Üretim ve Yapım Aşamaları

SSB yolları, asfalt yolların inşaatına benzer bir şekilde inşa edilir. Genel süreç, büyük miktarlarda yerleştirilebilen ve minimum iş gücü ve ekipmanla hızlı bir şekilde sıkıştırılabilen sıfır çökmeli bir beton karışımının yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasını içerir. SSB yollarının yerleştirilmesi için alt temel/alt tabaka hazırlanırken, konvansiyonel beton için beklenen aynı gereksinimler karşılanmalıdır. Alt temel ve alt tabaka, donma/çözülme döngüleriyle ilişkili sorunları önlemek için fazla suyu tahliye edecek şekilde düzenlenmelidir. SSB, alt tabakanın üzerine yerleştirildiğinde, alt tabaka doygun hale getirilir, böylece SSB karışımının nemini "çalmaması" sağlanır.

SSB karışımları genellikle sürekli akış pugmill mikserler (Şekil 3.9a) veya döner tambur mikser tesisinde (Şekil 3.9b) hazırlanır. Bazı durumlarda, SSB iş sahasına taşınırken döner tambur mikserlerde karıştırılmaktadır. Sürekli karıştırma pugmill tipi mikserler en sık kullanılan yöntem olup, yeterli karıştırma verimliliği sağlar, sahada kolayca kurulabilir ve nispeten büyük bir üretim kapasitesi sunar.



Şekil 3.9: SSB üretim tesisleri (a) sürekli akış pugmill mikser (b) döner tambur mikser

SSB'nin yerleştirilmesi, asfalt yol yapımına çok benzemektedir. Son yıllarda, sıkıştırma çubuğu eklenerek modifiye edilen finişerler, ilave sıkıştırma sağlar ve kaplamanın düzgünlüğünü ve yoğunluğunu artırabilir (Şekil 3.10). Ancak, ağır hizmet tipi finişerlerle sağlanan ekstra sıkıştırma nedeniyle bazı durumlarda çatlaklar oluşabilir. Bu yüzeysel kusurlar, sıkıştırma işlemi sırasında giderilebilir, ancak ağır ekipman kullanırken dikkatli olunmalıdır.



Şekil 3.10: SSB karışımının finişer ile serilmesi

SSB yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasının zamanlaması, bitmiş SSB kaplama tabakasının kalitesi için kritik öneme sahiptir. Yerleştirme ve sıkıştırma, beton henüz taze ve işlenebilirken, genellikle karıştırmadan sonraki 45 ila 90 dakika içinde yapılmalıdır. Bu nedenle, karıştırma işleminin iş sahasına yakınlığı, üretim ve inşaat hızlarının tutarlılığı ve koordinasyonu yol kalitesi için kritiktir. Bu nedenlerle, ek tabakaların yerleştirilme zamanlaması ve derz inşaat teknikleri de önemlidir. SSB'nin sıkıştırılması genellikle finişeri hemen takip eden Şekil 3.11'deki 10 tonluk çift tamburlu vibrasyonlu silindir ile gerçekleştirilir (ACI, 2001). Yüzeyi "yerleştirmek" için statik modda iki geçiş yapılabilir ve ardından birincil sıkıştırma vibrasyon modunda gerçekleştirilir. Vibrasyonlu silindirin dört ila altı geçişi genellikle istenen minimum %98 yoğunluğa ulaşmak için yeterlidir (Harrington, 2010). Son sıkıştırma işlemi, statik çelik tamburlu silindir veya lastik tekerlekli silindir ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 3.11: SSB karışımın çift tamburlu titreşimli silindirler ile sıkıştırılması

Derz kesimi, SSB yerleştirilmesinin muhtemelen en önemli parçasıdır. İyi planlanmış ve uygulanmış derzler, SSB yol yapısı için yeterli düzgünlük ve yoğunluk sağlar. Boyuna derzler, bitişik şeritler arasında serim yönüne paralel olarak inşa edilir ve enine derzler, serim yapılan şeridin sonlarında serim yönüne dik olarak üretilir (Şekil 3.12). Hava koşullarına bağlı olarak, şeritler arasında monolitik bir bağ oluşturmak için yaklaşık bir saat maksimum zaman dilimidir. Bu nedenle, şeritlerin ardışık olarak inşası en iyi yöntemdir. Ancak, bu yöntem trafik koşulları nedeniyle genellikle pratik bir seçenek değildir. Bu nedenle, bir şerit taze şeritle sıkıştırılamayacak kadar sertleştiğinde inşaat derzleri veya "soğuk derzler" oluşur. Soğuk boyuna derzi düzgün bir şekilde oluşturmak için, sertleşmiş şerit temiz bir

dikey yüzey oluşturacak şekilde kesilmeli ve taze şerit, sertleşmiş şeridi hafifçe aşacak şekilde yerleştirilmelidir. Ardından, üst üste gelen kısım taze şeride doğru tırmıklanarak derzde bir "höyük" oluşturulmalı ve bu, derz boyunca ilerlerken statik silindir tarafından sıkıştırılarak düzgün ve sağlam bir derz oluşturulmalıdır (Şekil 3.13).



Şekil 3.12: SSB tabakada enine derz kesilme işlemi



Şekil 3.13: SSB tabakada oluşturulan boyuna derz

SSB kaplamalı yollar için kütleme işlemi, minimal su içeriği nedeniyle önemlidir. Nemli kütleme genellikle tasarım dayanımının gelişmesine yardımcı olduğu ve sertleşmiş yüzeyin soyulmasını ve dağılmasını önlediği için tercih edilir. Bazı durumlarda, SSB yollarının 7 ila 14 gün süreyle nemli kürlenmesi ve trafikten korunması önerilir. Ancak, SSB kaplamalı yollar daha yaygın olarak 24 saat sonra trafiğe açılır. Bu uygulama, inşaat sırasında trafik yönetimi ile ilgili belirgin avantajlar sunduğu için daha arzu edilir.

4. BETON VE SSB KAPLAMALARDA LİF KULLANIMI

Lifler, mikro çatlakların oluşumunu ve bu çatlakların birbiriyle birleşmesini erteleyerek kırılma sürecini büyük ölçüde etkiler. Takviye olarak kullanılan lifler hem mikro hem de makro düzeyde çatlakların yayılmasını engellemeye yardımcı olabilir (Balaguru ve Surendra, 1992; Bentur ve Mindess, 2007). Lif takviyeli beton, çatlamaya karşı mükemmel direnç sunmanın yanı sıra, yüksek çekme dayanımı ve enerji emme kapasitesi de sağlar. Lifler, çimento bazlı malzemelerin performansını artırarak ekstra enerji emilimi sağlar (Balaguru ve Surendra, 1992; Johnston, 2001).

Mikro lifler, küçük boyutları sayesinde beton matrisinde sık bir dağılım oluşturur ve bu sayede çatlakların büyüyerek makro düzeye geçmesini önler, elastik davranışı iyileştirir. Diğer taraftan, makro lifler daha büyük boyutlarıyla elastisite modülünü artırır ve çekme ile eğilme dayanımlarını güçlendirir. Makro lifler, çatlakların makro düzeyde kontrol edilmesine yardımcı olur ve maksimum yük sonrası malzemenin davranışını iyileştirir. Mikro çatlaklar, malzemenin içinde başladığı için, makro liflerin aralarındaki büyük mesafe nedeniyle bu küçük çatlakları doğrudan etkileyemez. Makro liflerin etkili olabilmesi için çatlakların belirli bir gelişim seviyesine ulaşmış olması gereklidir (Betterman vd., 1995).

Çelik liflerin yüksek dayanımlı betonlara eklenmesi, çekme ve eğilme dayanımını artırarak enerji emme ve deformasyon kapasitesini geliştirmiştir. Polipropilen ve çelik liflerin birlikte kullanımı ise, betonun basınç gerilmeleri altında daha sünek bir davranış sergilemesini sağlamıştır (Kützing, 1997).

Karma lifli betonlarda çatlak ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, 30 mm'lik çelik liflerle birlikte 6 ve 12 mm boyunda polipropilen lifler ayrı ayrı kullanılmıştır. Isıl çatlamaların önemli olduğu erken yaşlarda 2, 3 ve 5 günlük numunelerde yapılan deney sonuçları, mikro, makro ve karma lifli beton numunelerinden elde edilen yük sehim eğrileri incelendiğinde, tek başına mikro lif kullanımının ilk çatlak dayanımını artırdığı, sadece makro lif kullanımının betonun kırılma tokluğunu iyileştirdiği belirtilmektedir. Uygun tip ve hacimdeki lif kombinasyonlarının kullanımı, daha yüksek performans sağlamakla birlikte, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan gerilmeler nedeniyle oluşabilecek çatlakların kontrol altına alınmasını mümkün

kılmaktadır. Optimum lif hacim oranının, kullanılan lif türüne bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir; çelik lifler için bu oran %0,10-2,50 aralığında, polipropilen lifler için ise %0,3 olarak tespit edilmiştir. Mikro polipropilen liflerin hacim oranı %0,30 değerini aştığında, betonun mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür (Kim vd., 1999).

Uçucu kül miktarı ve lif boyutu ve hacminin etkisinin inceledikleri diğer bir çalışmada, ultra incelikteki polipropilen liflerin kullanıldığı karma lifli betonların üretiminde uçucu külün, liflerin matriks içerisinde homojen dağılımına katkı sağladığını belirtmişlerdir. Sentetik mikro lifler ise betonda yüzey nemi kaybından kaynaklanan erken yaştaki plastik rötre çatlaklarının görünümünü en aza indirmek amacıyla 1980'lerde uygulanmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, sentetik mikro liflerin betonun yük-sehim tepkisini iyileştirmediği ve bu nedenle beton döşeme ve kaplamaların yapısal tasarımında yeterli düzeyde iyileştirme sağlayamadığı belirlenmiştir. Sentetik makro lifler, beton malzemelerin ve plakların eğilme tokluğunu iyileştirmek için çelik makro liflere alternatif bir malzeme olarak yaklaşık 20 yıl önce kullanılmaya başlanmıştır. Kaplamalar için lif takviye teknolojisi, beton kaplamaların yorulma ömrünü iyileştirmek için çelik makro liflerin kullanıldığı araştırma ve uygulamaların çoğu on yıllardır kullanılmaktadır. Beton kaplama performansına sağladığı kanıtlanmış faydalarına rağmen, çelik makro lifler için önerilen yüksek hacimli fraksiyonlar, karışım tasarımı değişikliklerinin gerekliliği, inşa edilebilirlik sorunları, korozyonla ilgili endişeler nedeniyle çelik lif takviyeli betonu tercih edilmeyen bir seçenek haline getirmiştir. Polipropilen lifler genellikle boyutuna göre mikro ve makro olarak ikiye ayrılır. Mikro polipropilen lifler, betonun erken çatlaklarını önemli ölçüde engelleyebilir, ancak beton üzerinde belirgin bir güçlendirme ve toklaştırma etkisi yoktur. Çelik elyafın ikame malzemesi olarak da bilinen makro polipropilen lifler, çelik elyaf ile karşılaştırılabilir güçlendirme ve toklaştırma etkisine sahiptir. Birçok araştırma, hibrit elyaf takviyeli betonun, farklı elyafların birbirini tamamlamasını ve beton matrisinin mekanik özelliklerini geliştirmesini sağlayabildiğini göstermiştir. Özellikle, mikro ve makro-PPF'lerin belirli bir oranda beton matrisine hibrit ilavesi, tek bir lif ilavesinden daha iyi performans göstermiştir (Qian ve Stroven, 2000).

Geri dönüştürülmüş agregalar ve atık plastik şeritler içeren silindirle sıkıştırılmış beton temel malzemelerde yorulma hasarını değerlendirmek amacıyla yapılan bir çalışmanın sonuçları yayımlandı. Performansın birincil ölçümleri, malzemedeki esnek yorulma davranışını ve

yorulma hasarının birikimini değerlendirmek için tekrarlı yk testlerini içeriyordu. SSB malzemesinin, performans seviyelerinin yüksek yoğunluklu polietilen takviyeli rneklerinkilerle karşılaştırılabilir, hatta daha iyi olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, yorulma mukavemeti ve dayanıklılığının tipik stabilize edilmiş yol temeli malzemelerine benzer olduğunu göstermiştir. Ayrıca, tekrarlı döngüsel yükleme ile üretilen kümülatif kalıcı deformasyonun, harcanan yorulma ömrüyle doğrusal olmayan bir g denklemiyle doğrudan ilişkili olduğu ve geri dönüştürülmüş alternatif malzemedeki hasar birikiminin Miner'in kümülatif hasar kuralına uygun olduğu belirlenmiştir (Sobhan ve Mashnad, 2001). Beton, çeşitli boyutlarda imento hamuru, kum ve iri agrega içeren çok fazlı bir malzemedir. Bu yapı nedeniyle, tek tip ve boyutta lif kullanımı tüm fazlardaki iyileştirmeleri sağlamakta yetersiz kalabilir (Yao vd., 2002). Bu sorunları çözmek amacıyla, karma lifli beton uygulamaları devreye girer. Karma lifli beton, çeşitli tip ve boyutlardaki liflerin birlikte kullanılmasıyla elde edilen bir kompozit malzemedir ve betonun farklı özelliklerini iyileştirmek için tasarlanmıştır (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Üç farklı tip karma lifin betonun basınç, yarmada çekme ve eğilme özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, lif hacim oranı %0,50 olarak sabit tutulmuştur. Bu çalışmada, polipropilen ve karbon, karbon ve elik, elik ve polipropilen liflerin kombinasyonlarını içeren üç farklı karma lifli beton türü üretilmiş, ayrıca her bir lif türünü tek başına içeren ve lif içermeyen kontrol numuneleri de hazırlanmıştır. Sonuçlar, karma lif kullanımının betonun performansını, tek tip lif kullanımına göre daha fazla iyileştirdiğini göstermiştir. En yüksek dayanım ve eğilme tokluğu, karbon ve elik liflerin birlikte kullanıldığı beton numunelerinde elde edilmiştir. Bu durumun nedeni, elik ve karbon liflerinin benzer elastisite modüllerine sahip olmaları ve aralarındaki olumlu etkileşimdir (Yao vd., 2002).

Yüksek dayanımlı betonun basınç altında sergilediği gevrek davranışı iyileştirmek amacıyla polipropilen ve elik lifler kullanılmıştır. Süneklik ve tokluğun artırılması için elik ve polipropilen liflerin birlikte kullanıldığı betonlarda, polipropilen lif oranı %0,05 ve elik lif oranı %3 olarak sabit tutulmuştur. Bu çalışmada, elik liflerin eklenmesinin, başta kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı olmak üzere, basınç dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımlarında da belirgin bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. Maksimum kırılma enerjisi, karakteristik boy ve net eğilme dayanımı değerleri narinliği ve boyu en büyük lif ile üretilen numuneden elde edilmiştir (Ekincioglu, 2003).

Bu malzemenin üretimindeki temel amaç, yük altında ortaya çıkan çatlakların başlangıç aşamasında kontrol altına alınmasıdır. Bunu başarmak için mikro ve makro boyuttaki liflerin kombinasyonu kullanılır (Taşdemir ve Kocatürk, 2005). Polipropilen lif ile çimentonun bir kısmının yerine uçucu kül kullanımının SSB özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmada, maksimum agrega tane çapı 25 mm ve çimento dozajı 300 kg/m³ olan SSB numunelerinde, çimento yerine ağırlıkça %20, %40 ve %60 oranlarında uçucu kül ile betonun hacminde %0,25, %0,50 ve %0,75 oranlarında polipropilen lif kullanılmıştır. 7, 28 ve 90 günlük yaşlandırma süreleri sonunda yapılan basınç, yarmada çekme, eğilme ve darbe testleri, %40 ve %60 oranlarında uçucu kül kullanımının mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini, ancak polipropilen liflerin mekanik özellikler ve darbe direnci açısından önemli iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur (Üte, 2008).

Zorlu iklim koşullarında, termal genişleme ve büzülmeden kaynaklanan çatlakların ve yüzey bozulmalarının riskini liflerin kullanımıyla önemli ölçüde azaltmak mümkündür (Bolat vd., 2014). Lif tipi ve oranının SSB karışımların bazı mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada, nem-yoğunluk ilişkisi modifiye proktor yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çalışmada, maksimum agrega tane çapı 19 mm ve çimento dozajı 282 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Mekanik özellikleri artırmak amacıyla, %0,20 ve %0,40 oranlarında 6 farklı sentetik ve 2 farklı çelik lif kullanılmıştır. Üretilen SSB numuneleri üzerinde 28 gün boyunca basınç, yarmada çekme ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, lif kullanımının SSB'lerin mekanik performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Lahucik vd., 2017).

SSB karışımlarına (0, 0.5, 1, 1.50, 2 ve 2.50 kg/m³) polipropilen (PP) lif ilave edilmesinin karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini inceledikleri bir çalışmada, PP lif içeriğinin artmasıyla su emiliminin arttığı ve SSB'nin işlenebilirliğinin azaldığı görülmüştür. Bir kilogram polipropilen (PP) lif içeren karışımların, lif içermeyen karışımlara kıyasla çekme dayanımını yaklaşık %23 oranında artırdığı ve PP liflerin SSB'de kullanıldığında dayanım açısından tatmin edici sonuçlar sağladığı bulunmuştur (Benouadah vd., 2017). Farklı su/çimento oranlarına sahip beton karışımlarında çelik ve yüksek yoğunluklu polietilen makro liflerin mekanik ve kırılma parametreleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada, su/çimento oranı 0,50 olan karışımlarda polietilen makro lif eklenmesi, betonların eğilme dayanımını %12 ve kırılma enerjisini %18 oranında artırmıştır. Aynı

betonda elik makro lif eklenmesi ise kırılma enerjisinde yaklaşık 40 katlık bir artış sağlamıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,35 olan betonda, %1 oranında elik ve polietilen makro lif ilavesi kırılma enerjisini 24 kat artırırken, eğilme dayanımını %92 oranında yükseltmiştir. Su/imento oranı 0,28 olan karışıma %2 oranında polietilen makro lif eklenmesi, özgül kırılma enerjisinde 14 kat artış ve yarmada çekme dayanımında %10 artış göstermiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, tüm beton serilerinde lifli betonların kuruma rötresi, referans betona göre daha düşük çıkmış ve yüksek yoğunluklu makro liflerin özellikle erken yaşlarda rötreyi önlemede elik liflere göre daha etkili olduğu bulunmuştur (Sertkaya vd., 2018),

54 mm uzunluğunda ve 0.677 mm çapındaki makro sentetik elyafların beton karışımına %0, %0,2, %0,4 ve %0,6 oranlarında ilave edildiği çalışmada, dört farklı su içeriği kullanılarak toplamda on altı farklı SSB karışımı üretilmiştir. Her bir elyaf oranı için zemin sıkıştırma yöntemiyle SSB'nin maksimum kuru birim ağırlığına uygun optimum su içeriği belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, maksimum sıkıştırılabilirlik için gereken su içeriği değerleri sırasıyla %7,3, %7,4, %7,5 ve %7,8 olarak hesaplanmıştır. Araştırma, makro sentetik elyaf miktarındaki artışın SSB karışımlarının basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemediğini, ancak %0,40 oranında makro sentetik elyaf kullanımının SSB'nin yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir (Algın vd., 2019).

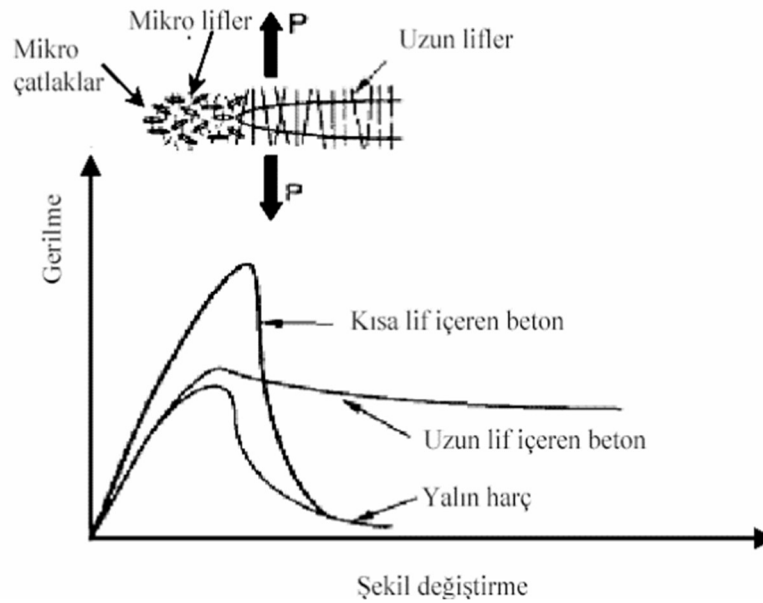
elik liflerle üretilen SSB kaplamaların mekanik davranışının belirlendiği bir çalışmada, hacimce %0,50 ve %1,00 oranlarında kancalı uçlu elik lifler kullanılmıştır. Her tür SSB kaplama için optimum nem içeriğini belirlemek amacıyla karışım oranlama sürecinde modifiye Proctor testi uygulanmıştır. Ek yük altında kıvamlarını belirlemek için Vebe kıvam testi kullanılmıştır. Deney serisi, farklı beton yaşlarında basınç dayanımı, gerinim enerji yoğunluğu, eğilme dayanımı, eğilme tokluğu ve kalıcı dayanım gelişimini araştırmak için basınç ve eğilme performans testlerinden oluşmaktadır. Testler 3, 7, 14 ve 28 günlerde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, lif takviyeli silindirle sıkıştırılmış beton kaplamaların su gereksinimi ve yoğunluğunun kontrol karışımlarına göre biraz daha yüksek olduğunu göstermiştir. Basınç dayanımının lif içeriğinin artmasıyla %1-2 oranında azaldığı bulunmuştur. Ancak, elik liflerin eklenmesiyle eğilme dayanımı, tokluk ve kalıcı dayanım önemli ölçüde iyileşmiştir. Tüm mekanik özelliklerin yaşla birlikte arttığı görülmüştür (Sukontasukkul vd., 2019).

Farklı tip (çelik, Kortta Emboss, Kortta Twist ve Sinüzoidal plastik) ve miktarlarda lifleri dikkate alarak SSB kaplamanın dayanım özelliklerinin belirlendiği bir çalışmada, taze beton üzerinde sıkıştırma süresi (Vebe) testi, sertleşmiş beton üzerinde ise basınç dayanımı, elastik modül, eğilme dayanımı, Brezilya çekme dayanımı, darbe direnci, elektrik direnci ve kayma direnci testleri yapılmıştır. Toplamda 17 lif takviyeli beton karışımı ve bir kontrol numunesi dikkate alınmıştır. Test sonuçları, çelik lif içeren numunelerin basınç, eğilme ve çekme dayanımlarının sırasıyla %27, %83 ve %25 oranında iyileştiğini göstermiştir. Ayrıca, Kortta Emboss lif içeren numunelerin eğilme ve çekme dayanımları sırasıyla %80 ve %19 oranında iyileşmiştir. Çelik ve Kortta Emboss lif içeren numunelerin darbe dirençleri ise sırasıyla %270 ve %290 oranında önemli ölçüde artmıştır. Tüm testlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, SSB kaplamaların özelliklerini ve işlevlerini iyileştirmek için incelenen lifler arasında Kortta Emboss lif en iyi seçenek olarak önerilmiştir. Kessal vd. (2022), SSB için biyo-liflerin uygulanabilirliğini test etmeye yönelik çalışmada, yol yapımı için tasarlanmış farklı bir tür SSB üretmek amacıyla hurma lifleri (Date Palm Fiber-DPF) dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu liflerin iki tür karışım üzerindeki etkisini belirlemek için deneysel bir araştırma yapılmıştır: (i) hava sürükleyici madde (Air-Entraining Agent-AEA) içermeyen (ii) AEA içeren. Doğal ve %0,10 DPF takviyeli SSB karışımlarıyla deneyler yapılmıştır. Dört AEA seviyesi (%0, %0,01, %0,05 ve %0,10) ve iki sıkıştırma enerjisi seviyesi (2400 kJ/m^3 ve 4800 kJ/m^3) ile 12 karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlar, basınç dayanımı, aşınma direnci (Cantabro testi) ve ultrasonik darbe hızı açısından test edilmiştir. Dayanıklılıkla ilgili olarak, donma-çözülme direnci araştırılmıştır. Sonuçlar, hurma liflerinin eklenmesinin önemli bir etki yarattığını, yalnızca fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda SSB karışımlarının dayanıklılığını da önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Faktöriyel deneysel tasarım metodolojisi kullanılarak bu faktörler arasındaki ilişkiler tamamlanmış ve SSB özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller geliştirilmiştir (Sharbatdar ve Rahmati, 2022).

Polipropilen ve poliolefin olmak üzere iki makro sentetik lifin SSB kaplamanın özellikleri belirlemek için yapılan laboratuvar çalışmasında, 2.0, 3.0 ve 4.0 kg/m^3 'lük lif dozajlarında hazırlanan SSB karışımlarının 7, 14 ve 28 günlük basınç, yarma çekme ve eğilme mukavemetleri belirlenmiştir. Test sonuçları, 2.0 ve 3.0 kg/m^3 lif katkı oranlarında modifiye edilmiş numunelerin basınç dayanımını artırabildiğini, ancak 4.0 kg/m^3 eklemenin basınç dayanımını azalttığını ortaya koymuştur. Bu arada, lif katkı maddeleri sayesinde SSB

karışımlarının çekme ve eğilme mukavemetleri, özellikle ilerleyen yaşlarda önemli ölçüde iyileşmiştir. Polipropilen lif içeren numunelerin, poliolefin liflerine kıyasla daha yüksek çekme ve eğilme mukavemetleri gösterebileceği ve lif miktarında 4.0 kg/m³'e kadar olan herhangi bir artışın, karışımların mukavemetini azalttığı gözlenmiştir. Lif türünden bağımsız olarak, 3.0 kg/m³ lif içeren karışımların toklukları, eğilme yüklerine dayanmak için katkısız betondan daha iyi performans göstermiştir. Vebe testi sonuçları, sentetik liflerin eklenmesinin Vebe süresini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymuştur. Son olarak, yarma çekme mukavemeti (f_t) ve eğilme mukavemeti (f_r) ile basınç mukavemeti (f_c') arasındaki ilişkiler sırası ile $f_t = 0.41\sqrt{f_c'}$ ve $f_r = 0.60\sqrt{f_c'}$ olarak elde edilmiştir (Jahanbakhsh vd., 2023).

Mikro lifler, çatlaklar henüz mikro düzeydeyken arada köprüler oluşturarak bu çatlakların yayılmasını engeller. Küçük boyutları sayesinde matrisin her yerine dağılılabilen bu lifler, makro liflerin bulunmadığı bölgelerdeki küçük çatlakların oluşumunu ve büyümesini kontrol edebilir. Ancak, çatlaklar genişledikten sonra mikro liflerin etkisi azalır çünkü küçük boyutları nedeniyle matristen ayrılabilirler. Bu sebeple, tepe yükü sonrası malzemenin performansında makro lifler daha etkili bir rol oynar. Hibrit kullanımda mikro liflerin makro liflere sağladığı destek ve liflerin çatlak köprülenmesindeki etkisi Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1: Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi (Betterman vd., 1995).

Betonda yük altında oluşan çatlakların mikro düzeyden başlayarak kontrol edilebilmesi, mikro ve makro boyuttaki liflerin kullanımı ile sağlanabilmektedir. Mikro lifler, boyutları itibariyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluşturarak, çatlakları makro düzeye gelmeden yavaşlatırlar ve elastik bölgedeki davranışı iyileştirirler. Makro boyuttaki lifler ise, elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını artırır, makro düzeydeki çatlakları kontrol ederler ve maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirirler.

Çelik olmayan liflerin SSB'nin SSB karışımların hacimce %0,1, %0,3 ve %0,5 oranlarında üç tür lif (Barchip, Emboss ve cam lifleri) kullanılarak hazırlandığı bir çalışmada, Vebe süresi, elastisite modülü, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve çekme dayanımı belirlenmiştir. Sonuçlar, SSB'ye çelik olmayan liflerin eklenmesinin basınç dayanımını %5 oranında azalttığını veya arttırdığını, elastisite modülü ve eğilme dayanımında küçük bir azalmaya neden olduğunu ve çekme dayanımını %20'ye kadar artırdığını göstermiştir. Ayrıca, lifler temel karışımın kıvamını azaltmış ve Vebe süresini artırmıştır. Barchip ve Emboss lifleri, cam liflerine kıyasla çatlak sonrası daha iyi bir yumuşama davranışı sergilemiştir. Lif hacim yüzdesi arttıkça tokluk miktarı artmış ve bu artış Barchip lifinde Emboss lifine göre daha fazla olmuştur. En iyi çatlak sonrası davranış, %0,5 hacim yüzdesi ile Barchip lifi tarafından gösterilmiştir (Arabyarmohammadi vd., 2023).

Karışım hacminin %0,10, %0,30 ve %0,50 oranlarında ve 20 mm uzunluğunda poliolefin-aramid lifi ile modifiye edilmiş SSB'nin farklı yükleme modlarında (saf mod I, saf mod II ve karma mod I/II) kırılma direncini belirlenmek amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada, doğrusal elastik kırılma mekaniği kullanılmıştır. Sonuçlar, saf mod II yükleme koşullarında SSB'nin minimum kırılma tokluğunun meydana geldiğini göstermiştir; bu durum hem kontrol hem de poliolefin-aramid lif takviyeli SSB'nin saf mod II koşullarında kırılmaya karşı daha az direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. Poliolefin-aramid liflerinin, karışımın ağırlığının %0,3'ünden daha fazla eklenmesinin, kırılma direncinde önemli bir iyileşmeye yol açmadığı bulunmuştur (Yousefi ve Golchin, 2020).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kullanılan malzemeler ve numune hazırlama süreçleri açıklanmıştır. Farklı lif oranlarına sahip numuneler belirlenen standartlara göre hazırlanarak deney prosedürüne uygun şekilde test edilmiştir. Deney sırasında elde edilen veriler toplanmış ve gözlemler detaylı olarak raporlanmıştır.

5.1. Çalışma Kapsamı

Bu çalışmada, hibrit sentetik liflerin karayolu üstyapılarında kullanılan SSB'nin dayanım özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, hem tek başına makro liflerin hem de hibrit lif ilavesinin etkileri incelenerek optimum lif ilave oranları belirlenmiştir. Polipropilen makro lifler hacimce %0,20, %0,40, %0,60 ve %0,80 oranlarında kullanılmıştır. SSB karışım numunelerinin, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, permeabilite ve aşınma dayanım değerleri belirlenmiştir. Tespit edilen optimum makro lif oranında karışımın hacimce %0,05, %0,10 ve %0,20 oranlarında mikro lif ilavesiyle elde edilen hibrit numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Karışımın genel performansı üzerinde oluşturabilecekleri etkiler değerlendirilmiştir.

5.2. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışma kapsamında, makro liflerin etkileri üzerinde yoğunlaşacağından önceki çalışmalar ve şartnamelerde belirtilen koşulları sağlayan tek tip agrega ve çimento bağlayıcısı kullanılmıştır.

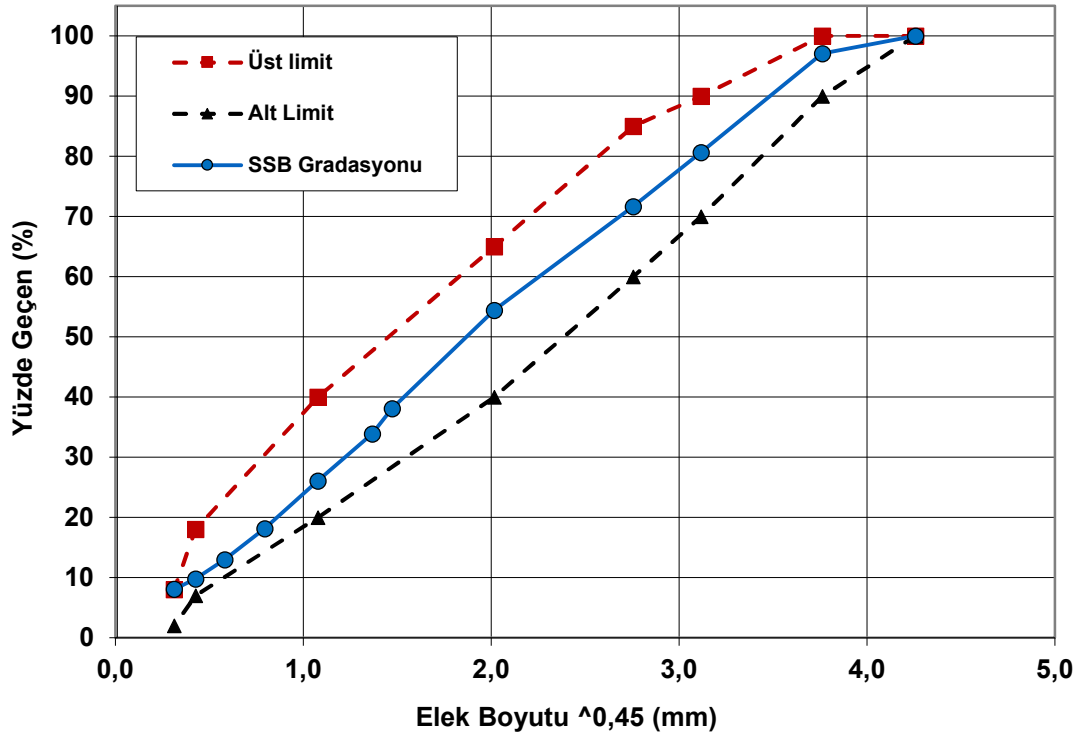
5.2.1 Agregalar

Laboratuvar çalışmasında Bartın İl Özel İdaresinin Şantiyesinden temin edilen üç farklı fraksiyonda agrega kullanılmıştır. Tablo 5.1'de her bir agrega fraksiyonu için gerçekleştirilen elek analizleri ve şartname karışım limitleri dikkate alınarak belirlenen agrega karışım oranları verilmiştir. SSB kaplama karışımlarının hazırlanmasında kullanılan agrega gradasyon eğrisi Şekil 5.1'de verilmiştir.

SSB numunelerinde kullanılan agregalar kullanılmadan önce 110 derecelik fırında 1 gün boyunca kurutulmuştur. Kullanılan agregalar TS 706 EN 12620+A1 standardına uygundur.

Tablo 5.1: Agregalar karışım oranlarının belirlenmesi

Elek No	Elek Çapı (mm)	Elek Çapı $\sqrt{0,45}$ (mm)	Elek Üstünde Kalan (g)			Yüzde Geçen (%)			Agrega Gradasyonu	Şartname Limitleri	
			22-12 mm	12-5 mm	5-0 mm	22-12 mm (%25)	12-5 mm (%25)	5-0 mm (%50)		Alt Limit	Üst Limit
1"	25.00	4.257	0	0	0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
3/4"	19.00	3.762	524.17	0	0	88.3	100.0	100.0	97.1	90	100
1/2"	12.50	3.116	2908.73	26.98	0	23.3	99.2	100.0	80.6	70	90
3/8"	9.50	2.754	960.54	507.12	0	1.9	84.8	100.0	71.7	60	85
No.4	4.75	2.016	78.54	2293.8	4.65	0.1	19.3	99.1	54.4	40	65
No.8	2.36	1.472	1.15	619.58	119.16	0.1	1.6	75.2	38.0		
No.10	2.00	1.366	-	-	42.06	0.1	1.6	66.8	33.8		
16	1.18	1.077	0.41	22.4	76.2	0.1	1.0	51.6	26.1	20	40
30	0.60	0.795	0.5	14.58	78.18	0.1	0.6	36.0	18.1		
50	0.30	0.582	0.63	10.07	50.8	0.0	0.3	25.8	13.0		
100	0.15	0.426	0.8	6.22	31.35	0.0	0.1	19.5	9.8	7	18
200	0.075	0.312	1.14	4.31	18.95	0.0	0.8	15.7	8.1	2	8



Şekil 5.1: SSB Karışım Agregası Gradasyon Eğrisi

5.2.2 Çimento Bağlayıcı

SSB karışımların üretiminde, Bartın Çimento Fabrikası ürünü olan CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. CEM I 42,5 R sınıfındaki çimento, Portland çimentosu klinkeri, priz düzenleyici olarak alçı taşı ve minör ilave bileşen ile öğütülmesi sonucu elde edilen TS EN 197-1 standardına uygun bir çimentodur. Çimentoya ait tipik fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 5.2’de verilmiştir. Karışımlarda çimento dozajı 350 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur.

Tablo 5.2: Çimento bağlayıcıya ait fiziksel özellikler

Özellikler	Birimler	Analiz Sonuçları	Standart Limitleri
Özgül Ağırlık (ISO 17892-3)	gr/cm ³	3,07-3,18	
Özgül Yüzey (EN 196-6)	cm ² /g	3100-4400	
0,045mm elek üstü (EN 196-6)	%	0,2-7,0	
0,090 mm elek üstü (EN 196-6)	%	0,0-1,0	
Priz Başlangıcı (EN 196-3)	Dakika	90-245	Min. 60
Priz Bitişi (EN 196-3)	Dakika	130-330	
Genleşme (EN 196-3)	mm	0,0-4,0	Max. 10,0
Kıvam Suyu (EN 196-3)	%	25,0-29,0	
2 Günlük Basınç Dayanımı (EN 196-1)	MPa	21,0-35,0	Min. 20,0
28 Günlük Basınç Dayanımı (EN 196-1)	MPa	48,0-62,5	Min. 42,5 Max. 62,5

5.2.3 Makro Sentetik Lifler

Çalışmada, sentetik makro lif konsantrasyonunun SSB karışımların dayanımına etkisi üzerine yoğunlaşmıştır. Literatüre dayanılarak, Şekil 5.2’de görülen 54 mm uzunluğunda makro sentetik lif kullanımına karar verilmiştir. Fiziksel özellikleri Tablo 5.3’te verilen makro sentetik lif, beton hacminin %0,20, %0,40, %0,60 ve %0,80 oranlarında beton karışımına ilave edilmiştir.



Şekil 5.2: Makro sentetik lifler

Tablo 5.3: Makro sentetik liflerin fiziksel özellikleri

Asit & Tuz Dayanımı	Yüksek
Alkali Dayanımı	Yüksek
Elektrik İletkenliği	Düşük
Erime Sıcaklığı	160 C
Yanma Sıcaklığı	<590 C
Çekme Mukavemeti	600-800 Mpa
Termal İletkenlik	Düşük
Su Emme	Yok
Hammade	Polyolefin
Özgül Ağırlık	0.91
Lif Uzunluk	60 mm

5.2.3 Mikro Sentetik Lifler

Çalışmada, SSB karışımların dayanımları üzerinde hibrit lif etkisinin belirlenmesi için önceki aşamada belirlenen optimum makro lifli karışımlara beton hacminin %0,05, %0,1 ve %0,2 oranlarında Şekil 5.3'te görülen 19 mm uzunluğunda polipropilen mikro lif (Betonfiber-BF19) ilave edilmiştir. Life ait bazı fiziksel özellikler Tablo 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Mikro sentetik lifler

Tablo 5.4: Mikro sentetik liflerin fiziksel özellikleri

Asit & Tuz Dayanımı	Yüksek
Alkali Dayanımı	Yüksek
Elektrik İletkenliği	Düşük
Erime Sıcaklığı	162 C
Yanma Sıcaklığı	<593 C
Çekme Mukavemeti	450-700 Mpa
Termal İletkenlik	Düşük
Su Emme	Yok
Hammade	Polyolefin
Özgül Ağırlık	0.91
Lif Uzunluk	19 mm

5.3. Deney Yöntemleri

SSB karışımların tasarımında zemin sıkıştırma yöntemi esas alınarak katkısız ve katkılı numunelerin optimum su muhtevaları tespit edilmiştir. Optimum su muhtevalarında hazırlanan numuneler üzerinde dayanım, aşınma ve permeabilite testleri uygulanmıştır.

5.3.1 Optimum Su Muhtevasının Belirlenmesi

Bu çalışmada test edilecek numunelerin üretilmesi için ihtiyaç duyulan farklı makro ve mikro lif oranlarını içeren karışımların optimum su muhtevaları, ASTM C 1435 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Bu yöntemin izlenmesi, numunelerin hazırlanmasında standartlara uygunluk sağlamak ve sonuçların tekrarlanabilirliğini garanti altına almak açısından büyük önem taşımaktadır.

Optimum su muhtevasının belirlenmesi amacıyla, her bir karışım için beş farklı su içeriğinde deneme karışımları hazırlanmıştır. Bu yaklaşım, her karışımın en uygun su içeriğinin tespit edilmesine yönelik kapsamlı bir değerlendirme yapabilmek için gereklidir. Üretilen SSB deneme karışımları, daha önceden hazırlanmış ve kalıp yağı ile yüzeyleri yağlanmış kalıplara üç ayrı tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her tabaka, belirli bir enerji seviyesinde titreşimli tokmak kullanılarak 20 saniye süre ile sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırma işlemi, karışımın içerisindeki hava boşluklarını en aza indirerek, numunelerin maksimum yoğunluğa ulaşmasını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Sıkıştırma işlemi sırasında, sıkıştırılan tabakaya homojen bir şekilde güç aktarımını sağlamak amacıyla, güç aktarma milinin alt ucuna 148 mm çapında bir çelik plaka takılmıştır. Bu plaka, titreşimli tokmanın uyguladığı gücün yüzeye eşit bir şekilde dağılmasını ve numunenin her kısmının eşit şekilde sıkıştırılmasını sağlamaktadır. Şekil 5.4a'da görülen titreşimli kompaktör seti, bu sürecin etkin bir şekilde yürütülmesini sağlayan temel cihazlardan biridir.

Sıkıştırılmış numunelerin ıslak birim ağırlıkları ölçüldükten sonra, numuneler dikkatlice silindir kalıptan çıkarılmış ve üst ile alt bölgelerinden su muhtevası tayini için örnekler alınmıştır. Bu örnekler, Şekil 5.4b'de gösterildiği gibi hassas teraziler ile tartılmış ve 105°C'lik etüvde sabit bir ağırlığa ulaşana kadar kurutulmuştur. Bu kurutma işlemi, numunelerin su içeriklerinin tam olarak belirlenmesi için kritik bir adımdır. Deney sırasında, her bir su muhtevası için numunelere ait kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Bu ölçümler, her karışımın su muhtevası ile birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiyi ortaya koymak ve optimum su muhtevasını belirlemek için kullanılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında farklı makro lif oranlarını içeren SSB karışımlarının optimum su muhtevasının belirlenmesi için titizlikle yürütülen deneysel bir yöntem izlenmiştir. Bu yöntem, numunelerin standartlara uygun olarak hazırlanmasını ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamak amacıyla detaylı bir şekilde tasarlanmış ve uygulanmıştır.



Şekil 5.4: SSB karışımların optimum su muhtevelarının belirlenmesi (a) Titreşimli kompaktör (b) Su muhtevası numuneleri

5.3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Mekanik testler için numuneler, 350 kg/m^3 çimento dozajı için belirlenen optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Bu işlem, numunelerin standartlara uygun ve tekrarlanabilir sonuçlar vermesi amacıyla titizlikle yürütülmüştür. İlk olarak, makro sentetik lifların karışım içerisinde topaklanmasının önlenmesi ve homojen bir dağılım sağlanması için Şekil 5.5a'da gösterildiği gibi liflar, agrega ve çimento ile kuru bir şekilde karıştırılmıştır. Bu adım, lifların agrega harmanı içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve sonrasında eklenecek olan suyun lif yüzeylerine düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Karışım suyu, tüm malzemelere nüfuz edene kadar karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Bu süre zarfında, suyun her bir bileşen ile tam anlamıyla etkileşime girdiğinden emin olunarak, karışımın homojenliği garanti altına alınmıştır.

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, daha önceden hazırlanmış ve kalıp yağıyla yüzeyleri yağlanmış 100 mm çap ve 200 mm yükseklikte silindir kalıplar kullanılarak

numuneler üretilmiştir. Numuneler üç tabaka halinde kalıplara yerleştirilmiş ve her tabaka, Şekil 5.5b' de gösterildiği gibi ASTM C 1435 standardına uygun olarak 20 saniyelik bir süre boyunca 3 tabaka halinde titreşimli tokmak ile sıkıştırılmıştır.



Şekil 5.5: Deney numunelerinin hazırlanması (a) Lifin agrega harmanı ile kuru olarak karıştırılması (b) Numunelerin titreşimli kompaktör ile sıkıştırılması

Sıkıştırma işlemi tamamlanan numuneler, kalıplardan dikkatlice çıkarılmış ve 24 saat boyunca nemli bir ortamda bekletilmiştir. Bu süre, betonun ilk prizini alması ve erken dönem dayanım kazanımı açısından kritik öneme sahiptir. İlk 24 saatlik nemli kür süreci tamamlandıktan sonra, numuneler, nihai dayanım ve performans değerlendirmeleri için 7 günlük ve 28 günlük dayanım testleri amacıyla kür havuzlarında bekletilmiştir. Bu süreç, betonun hidratasyonunu tamamlaması ve nihai mekanik özelliklerini kazanması için gereklidir. Sonuç olarak, bu yöntemle hazırlanan numuneler, belirlenen standartlara ve şartnamelere uygun olarak üretilmiş ve kürlenmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri, 7 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonunda detaylı bir şekilde incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu süreç, hem araştırmanın güvenilirliğini artırmakta hem de elde edilen sonuçların doğruluğunu garanti etmektedir.

5.3.3 Tek Eksenli Basınç Deneyi

Bu çalışmada, TS EN 12390-3 standartlarına uygun olarak 100×200 mm silindir numuneler üzerinde Şekil 5.6a' da gösterildiği gibi tek eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Makro lifli karışımlar için 7 ve 28 günlük hibrit karışımlar için ise 28 günlük basınç dayanımları

belirlenmiştir. Her bir lif oranı için ise üç adet numune basınç deneyine tabi tutulmuştur. Tek eksenli basınç testi öncesinde, Şekil 5.6b' de gösterildiği gibi numunelere çift taraflı kükürt başlık uygulanmıştır. Basınç dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

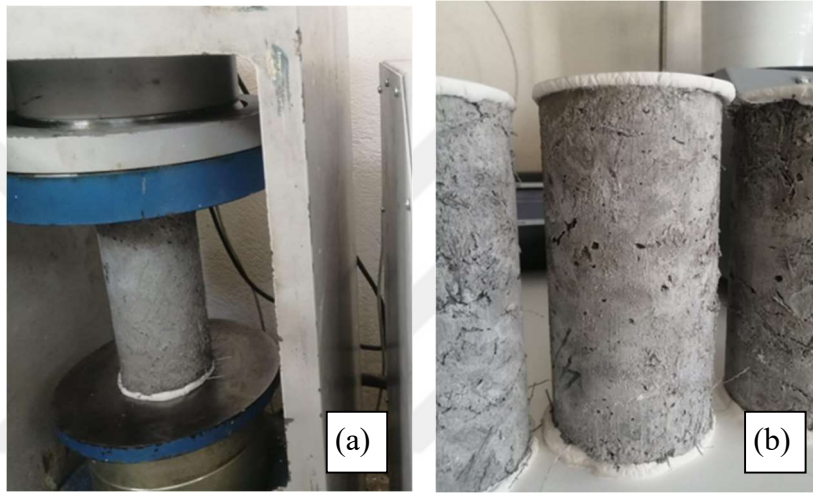
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa (N/mm²)

F : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm²



Şekil 5.6: Tek eksenli basınç testinin uygulanması (a) Numunenin test cihazına yerleştirilmesi (b) Numunelere çift taraflı kükürt başlık uygulanması

5.3.4 Dolaylı Çekme Deneyi

Bu çalışmada, TS EN 12390-6 standartlarına uygun olarak 100×200 mm silindir numuneler üzerinde Şekil 5.7'de gösterildiği gibi dolaylı çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Makro lifli karışımlar için 7 ve 28 günlük hibrit karışımlar için ise 28 günlük dolaylı çekme dayanımları belirlenmiştir. Her bir lif oranı için 3 numune dolaylı çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra yüzeylerindeki fazla suyun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Sıkıştırma şeritleri ve yükleme başlıklarının temas yüzeyleri ve numunelerin üzerindeki gevşek taneler ya da fazla malzemeler temizlenmiştir. Sıkıştırma şeritleri, numunenin üst ve alt kısımlarına merkezlenerek yerleştirilmiş ve yükleme başlıkları arasına dikkatlice sabitlenmiştir. Dolaylı çekme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi L d} \quad (2)$$

Burada;

f_c : Yarmada çekme dayanımı, MPa (N/mm²)
 F : Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N
 L : Numune boyu, mm
 d : Numune çapı, mm



Şekil 5.7: Dolaylı çekme testi

5.3.5 Rotating-Cutter Aşınma Dayanımı Deneyi

Bu deneyde, ASTM C944-99 standardına göre beton numunelerinin yüzey aşınma direnci test edilmiştir. Deneyde kullanılan aşınma cihazı Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Cihaz 200 devir/dakika dönme hızına sahip bir kesici uç içermektedir. Aşınmaya tabi tutulacak yüzey üstte olacak şekilde cihaza yerleştirilmiş ve 197 N yükte 2 dakika boyunca aşınmaya tabi tutulmuştur. Ayrıca aşındırılan yüzeyin farklı noktalarından kumpas yardımı ile ölçümler alarak deneye tabi tutulan makro ve hibrit (makro ile mikro) sentetik lif içeren numunelerin aşındırma dayanımları hesaplanmıştır.

5.3.6 Cantabro Aşınma Kaybı Deneyi

Cantabro Aşınma Kaybı deneyi 28 günlük numuneler üzerinde TS EN 1097-2 standardında belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney öncesinde ağırlıkları belirlenen numuneler, Şekil 5.9a’daki Los Angeles tamburunda 300 devire maruz bırakıldıktan sonra

iyice temizlenip tekrardan tartılmıştır. Şekil 5.9b’deki bir örneği görülen numunelerin deney öncesi ve sonrasında ağırlıkları kullanılarak 5.3 nolu denklemden SSB numunelerinde meydana gelen aşınma yüzdeleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.8: Rotating-Cutter aşınma cihazı

$$\% \text{ kayıp} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

Burada;

W1: Aşınmamış numune ağırlığı, g

W2: Aşınmış numune ağırlığı, g



Şekil 5.9: Cantabro aşınma kaybı deneyi (a) Los Angeles cihazı (b) Deney öncesi ve sonrasında numune örneği

5.3.7 Permeabilite Deneyi

Bu çalışmada, TS EN 12390-8 standartlarına uygun olarak 100×200 mm silindir numuneler üzerinde Şekil 5.10'da görülen test cihazı kullanılarak permeabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney, su içerisinde kür uygunlaşmış sertleşmiş betonda, basınç altında su işleme (nüfuz etme) derinliğinin tayini için yapılmıştır.



Şekil 5.10: Permeabilite deney cihazı

Numune, deney başlangıcında en az 28 günlük olmalıdır. Numune cihaza yerleştirilip 72 ± 2 saat süreyle 500 ± 50 kPa su basıncı uygulanmıştır. Şekil 5.11’ de gösterildiği gibi numunenin bölünmesiyle ortaya çıkan numune yüzeyinin, su işleyen kısım kesitinin belirgin şekilde görülünceye kadar kurutulmasından hemen sonra, ıslak alanın sınırları işaretlenir. Basınç uygulanan deney alanından itibaren suyun işlediği en büyük derinlik ölçülerek en yakın milimetreye yuvarlatılmak suretiyle deney sonucu olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.11: Permeabilite deneyi numune iç yüzeyinde su işleme derinliğinin belirlenmesi

6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

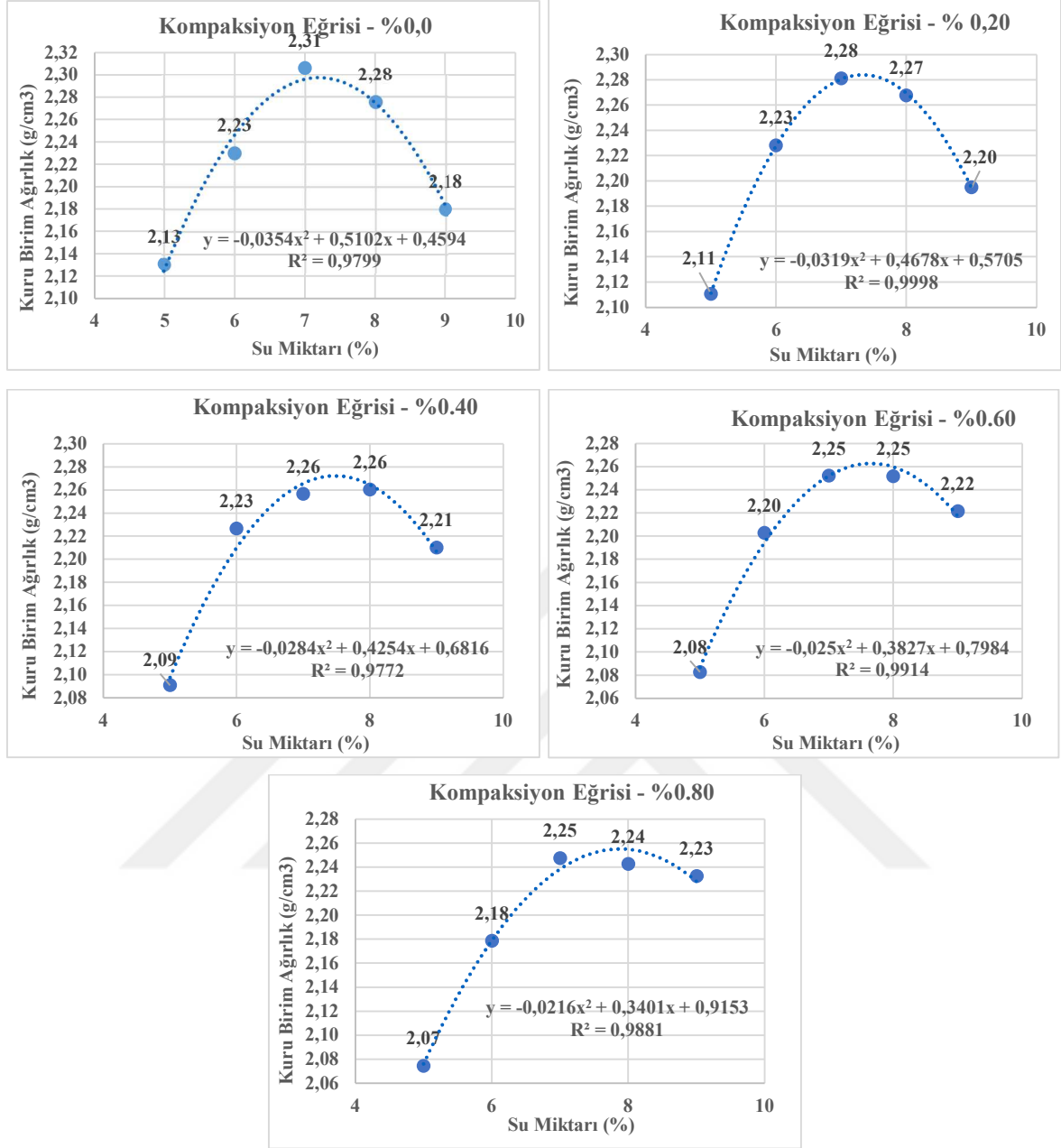
Bu bölüm, SSB karışımların tasarımında kullanılan modifiye kompaksiyon yöntemi ile belirlenen optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri ve optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, aşınma ve permeabilite testlerinin sonuçlarını ve ilgili değerlendirmeleri içermektedir. Bu deneysel çalışma iki aşama olarak planlanmıştır; ilk aşamada makro lif oranlarının (hacimce %0,2, %0,4, %0,6 ve %0,8) etkisi, ikinci aşamada ise belirlenen optimum makro lif oranında SSB karışımlara sentetik mikro lif ilave edilerek (hacimce %0,05, %0,1 ve %0,2) hibrit lif takviyesinin etkileri araştırılmıştır. İkinci aşamada hibrit olarak üretilen SSB karışımlar aşağıdaki şekilde kodlanmıştır:

- Opt. makro lif $\rightarrow H0 = \%0,60$ polipropilen makro lif
- Opt. makro lif + %0,05 mikro lif $\rightarrow H1$
- Opt. makro lif + %0,1 mikro lif $\rightarrow H2$
- Opt. makro lif + %0,2 mikro lif $\rightarrow H3$

6.1. Optimum Su Muhtevalarının Belirlenmesi

Yol uygulamalarındaki SSB karışım tasarımında yaygın olarak zemin sıkıştırma yöntemi tercih edilmektedir. Bu çalışmada, lif katkılı ve katkısız karışımların su muhtevaları ve S/Ç oranları modifiye kompaksiyon deneyi ile belirlenmiştir. Bu deneyde, her bir veri noktası, iki ayrı ölçümün (üst ve alt) ortalaması alınarak elde edilmiştir. Farklı lif oranlarına sahip SSB karışımlarının su içeriği ve kuru birim ağırlığı arasındaki ilişkinin incelendiği kompaksiyon eğrileri Şekil 6.1’de sunulmuştur.

Şekil 6.1 incelendiğinde, kontrol karışımı için maksimum kuru birim ağırlığa karşılık gelen optimum su içeriği değeri yaklaşık olarak %7,21 olarak tespit edilmiştir. Karışımlardaki lif miktarındaki artışın, optimum su içeriğinde bir artışa yol açtığı açıkça görülmektedir. Lif oranı %0,2, %0,4, %0,6 ve %0,8 olan karışımlar için w_{opt} değerleri sırasıyla %7.35, %7.50, %7.70 ve %7.82 olarak belirlenmiştir. SSB karışımlar için kompaksiyon eğrilerinden elde edilen optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru birim ağırlık ($\delta_{k,max}$) değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Belirlenen bu değerler SSB karışımların S/Ç oranlarının belirlenmesinde ve mekanik testler için numunelerin hazırlanmasında esas alınmıştır.



Şekil 6.1: SSB karışımlara ait modifiye kompaksiyon eğrileri

Tablo 6.1: Farklı lif katkılı SSB numunelerinin maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri

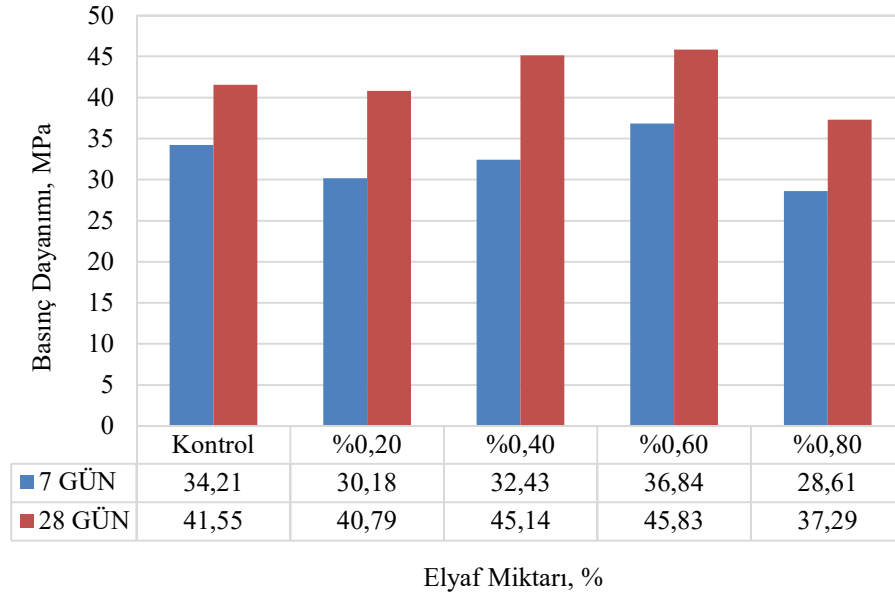
Lif oranı (%)	Regresyon denklemi	$\delta_{k,max}$ (g/cm ³)	w_{opt} (%)
0,0	$y = -0,0354x^2 + 0,5102x + 0,4594$	2,297	7,21
0,2	$y = -0,0319x^2 + 0,4678x + 0,5705$	2,285	7,35
0,4	$y = -0,0284x^2 + 0,4254x + 0,6816$	2,273	7,50
0,6	$y = -0,025x^2 + 0,3827x + 0,7984$	2,263	7,70
0,8	$y = -0,0216x^2 + 0,3401x + 0,9153$	2,255	7,82

Bu çalışmada, makro sentetik lif içeren SSB karışımlarının, kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında, maksimum kuru birim ağırlık değerlerinin azaldığı ve bu karışımların su ihtiyaçlarının arttığı görülmüştür. Bu durum, lif ilavesinin SSB karışımlarının yüzey artışıyla su tutma kapasitesini artırdığını ve bu nedenle daha fazla suya ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Lif içeriğindeki artışın, karışımın sıkıştırılabilirliği ve kompaktlığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu, maksimum kuru birim ağırlığın düştüğü tespit edilmiştir.

Makro sentetik liflerin SSB karışımlarına ilavesinin optimum su içeriğini artırdığı ve kuru birim ağırlığı azalttığı gözlemi, çeşitli araştırmalar tarafından da desteklenmektedir. Makro sentetik lifler, toprak stabilizasyon karışımlarının yoğunluğunu azaltırken, su tutma kapasitesini ve dolayısıyla optimum su içeriğini artırmaktadır (Zhang vd., 2020). Benzer şekilde, lif ilavesinin karışımların mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlarken yoğunluğu azalttığını ifade etmişlerdir (Consoli vd., 2009). Sonuç olarak, makro sentetik lif ilavesi, SSB karışımlarının optimum su içeriğini artırırken, kuru birim ağırlığını azaltmaktadır. Ayrıca bu deney sonuçları da lif oranının dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

6.2. Tek Eksenli Basınç Deney Sonuçları

% 0, 0,20, 0,40, 0,60 ve 0,80 oranlarında makro sentetik lif içeren numuneler üzerinde yapılan 7 ve 28 günlük tek eksenli basınç deneyi sonuçları Şekil 6.2’de verilmiştir. 7 ve 28 günlük numunelerin deney sonuçları incelendiğinde lif oranının etkisinin benzer olduğu görülmektedir. Dayanım değerleri %0,20’de ilavede az da olsa azalmış, bu azalma miktarının 28 günlük numunede daha az olduğu belirlenmiştir. %0,40 ve %0,60 lif ilavesinde artış gösteren basınç dayanım değerlerinin %0,8’de önemli düzeyde azalmaktadır. Bu değerlerin SSB standartlarında istenilen değerleri sağlamaktadır. En yüksek basınç dayanımı 7 ve 28 günlük numunelerde sırasıyla %7.70 ve %10 artışlarla %0,60 makro lif oranlı karışım numunelerinde gözlenmiştir. Literatürde yer alan diğer bir çalışmada, %0,67 oranında polipropilen esaslı makro lifin 28 günlük kür süresi sonunda betonun basınç dayanımında %8,97 oranında bir artış sağlandığını ortaya koymuştur (Liang vd., 2022).

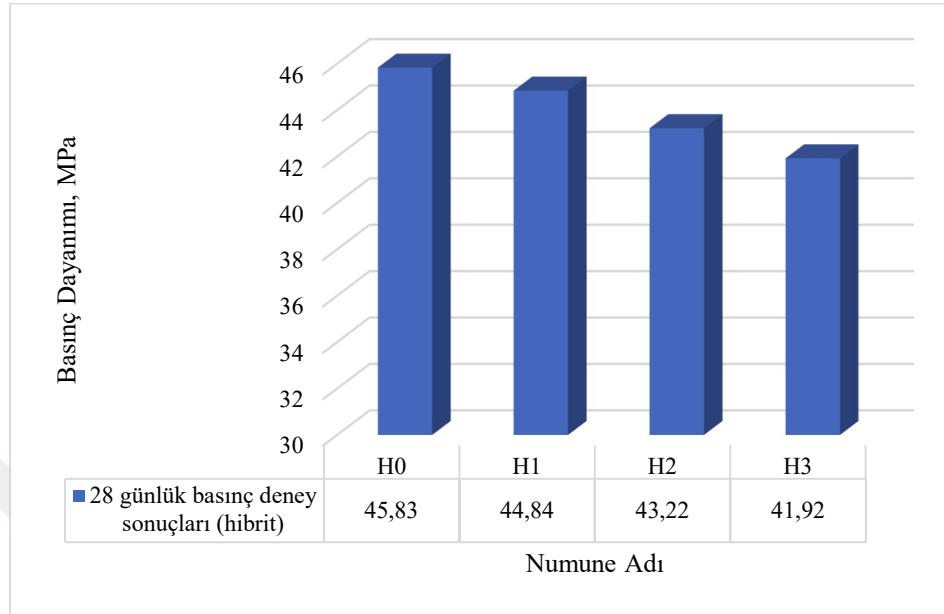


Şekil 6.2: 7 ve 28 günlük makro lif içeren numunelere ait basınç dayanım grafiği

Hibrit liflerin kullanılmasıyla hazırlanan numunelere uygulanan 28 günlük tek eksenli basınç deneyi sonuçları Şekil 6.3'te verilmiştir. Hibrit liflerin kullanıldığı numuneler (H1, H2 ve H3), 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı test sonuçlarında H0 göre sırasıyla %2,2, %6,0 ve %9,3 oranlarında düşüş göstermiştir. Bu düşüşler, yalnızca optimum makro lif içeren numunelerle karşılaştırıldığında gözlemlenmiştir. Bu veriler, makro lif hacminin azaltılmadan mikro lif kullanımının numunelerin basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Optimum düzeyde makro lifle birlikte mikro lif ilavesi genellikle betonun homojenliğini bozmakta ve bu nedenle basınç dayanımında azalmaya neden olmaktadır (Yoo ve Banthia, 2017). Diğer taraftan, hibrit lif kullanımıyla daha yüksek basınç dayanım artışı (%13,03) belirtilmektedir (Liang vd., 2022). Bu çalışmada, hibrit kullanımın elde edilen sonuçların literatürden farklılığı makro lif konsantrasyonun optimumda kullanılmasına bağlanabilir. Bu bulgular, polipropilen liflerin beton performansını iyileştirmede etkili olabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, makro ve mikro liflerin hibrit olarak kullanılması durumunda, basınç dayanımındaki artışın %13,03 oranına çıktığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, hibrit kullanımın literatürden farklılığı makro lif konsantrasyonun azaltılmadan kullanılmasına bağlanabilir. Bu bulgular, polipropilen liflerin beton performansını iyileştirmede etkili bir katkı maddesi olabileceğini göstermektedir. Araştırmada, makro liflerin betonun iç yapısındaki boşlukları doldurarak ve çatlak ilerlemesini engelleyerek dayanımı artırdığı, mikro liflerin ise daha homojen bir

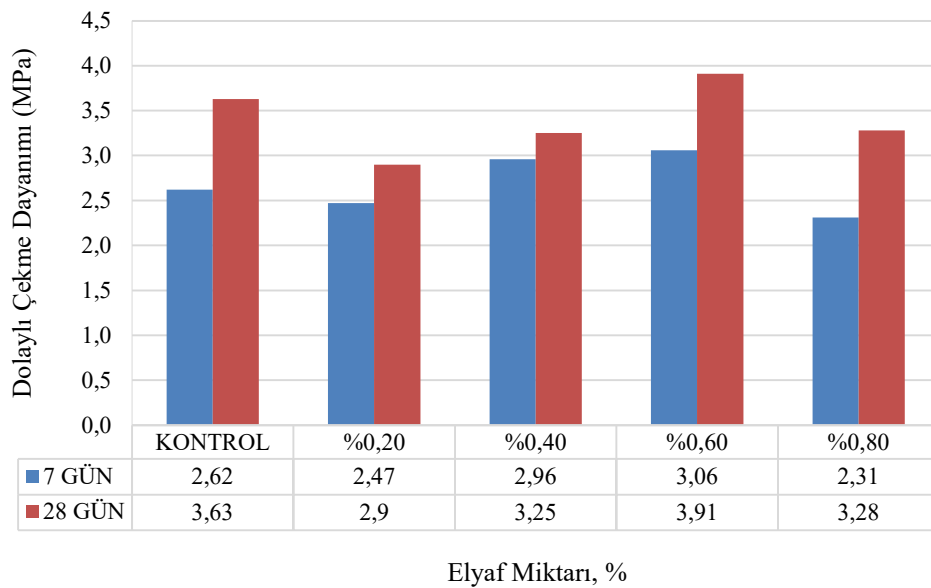
dağılım sağlayarak mikro çatlak oluşumunu minimize ettiği vurgulanmıştır. Bu sayede, hibrit liflerin kombine etkisiyle daha yüksek performanslı bir beton elde edilmiştir.



Şekil 6.3: Hibrit lifli numunelere ait 28 günlük basınç dayanım grafiği

6.3. Dolaylı Çekme Deney Sonuçları

Kontrol ve makro sentetik lif içeren numuneler üzerinde yapılan 7 ve 28 günlük dolaylı çekme deneyi sonuçları Şekil 6.4'te sunulmuştur.

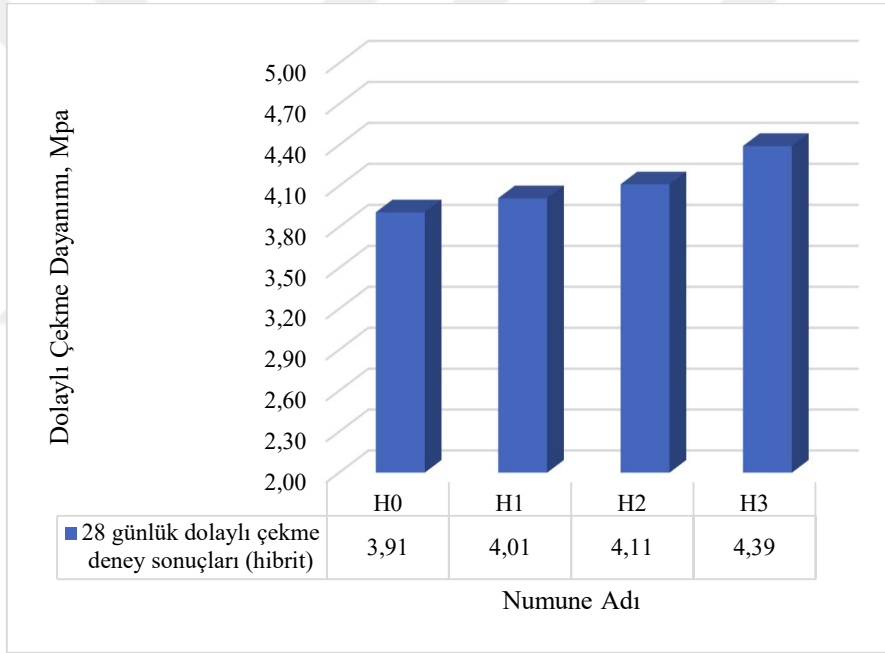


Şekil 6.4: 7 ve 28 günlük makro lif içeren numunelere ait dolaylı çekme dayanım grafiği

Deney sonuçlarına göre, SSB karışımlarının 7 günlük ortalama gerilme dayanımları kontrol ve lifli numunelerinde 2.62 ile 3.31 MPa arasında değişiklik göstermektedir. Benzer şekilde, 28 günlük ortalama dolaylı çekme dayanımları ise 2.63 ile 3.29 MPa arasında değişmektedir. Elde edilen verilere göre, kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında en yüksek gerilme dayanımı %0.60 oranında makro sentetik lif içeren karışım numunelerinde gözlenmiştir. %0,20 katkı miktarında her iki kür için de dayanımların azaldığı tespit edilmiştir. Düşük lif, beton matriks içerisinde aderansın azalmasına sebep olduğundan bu karışımlar betonun maruz kaldığı gerilmelere yeterince direnç gösteremez. Liflerin yeterli destek sağlayamaması, karışımın hızlı bir şekilde hasar görmesine yol açar ve bu durum, lifsiz kontrol numunesine kıyasla daha düşük performans sergilemesine neden olur. Karışımda lif oranı az olsa bile beton içerisinde belirgin bir boşluk oluşturmaktadır. %0.20 oranındaki makro lifler, beton içerisindeki boşlukları doldurmak yerine, yapının genel dayanımına katkıda bulunacak miktarda olmadığından, yeterli takviye etkisi göstermezler. Bu nedenle, bu oranlardaki lif içeren karışımlar, betonun bütünsel mukavemetine katkı sağlamak yerine, betonun yerini alarak karışımın zayıflamasına yol açabilir. Lifsiz kontrol numunelerine göre bu tür karışımlar, beklentilerin altında kalarak tatmin edici olmayan mekanik özellikler sergilerler. Literatürde bazı çalışmalarda da, bu durum kaydedilmektedir. Düşük lif oranlarının beton içindeki boşlukları yeterince doldurmadığını ve bu nedenle aderansın zayıfladığını, bu durumun da gerilmelere karşı direnci düşürdüğü ifade edilmektedir (Bentur ve Mindess, 2007). Aynı şekilde, liflerin düşük oranlarda kullanılması durumunda betonun dayanımına katkı sağlayamadığını, bunun da karışımın zayıflamasına ve kırılganlığının artmasına neden olduğunu belirtmiştir (Soroushian ve Bayasi, 1991).

Düşük oranlarda kullanılan makro liflerin, karışım içerisinde yeterli takviye etkisi sağlamadığı ve betonun yerine geçerek yapısal boşluklar oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, karışımın genel performansını olumsuz yönde etkileyerek, gerilmelere karşı yeterince direnç göstermemesine yol açmaktadır. Bu durum, lif oranının, betonun mekanik özelliklerine katkıda bulunacak düzeyde belirlenmesi gerektiğini ve düşük lif oranlarının tatmin edici sonuçlar vermediğini göstermektedir. Bu tespitler, makro lif katkısının beton karışımlarındaki optimum seviyesinin belirlenmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır. 7 ve 28 günlük en yüksek dolaylı çekme dayanımları sırasıyla %16.8 ve %7.7 artışlarla %0.60 oranında makro lif içeren karışım numunelerinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, makro lif ilavesinin erken dönem çekme dayanımında daha etkili olduğunu göstermektedir. Ancak,

%0.80 oranında lif ilavesinde, dayanım değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Bu bulgu, lif içeriğinin belirli bir oranın üzerine çıkıldığında, karışımın mekanik özelliklerine olumsuz etkiler yapabileceğini işaret etmektedir. Lif oranı belirli bir eşiği aştığında, betonun işlenebilirliği azalabilir, lifler arasında topaklanma veya düzensiz dağılım meydana gelebilir. Bu da betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkileyerek dayanım kayıplarına yol açar. Bu sonuçlar literatürde de desteklenmektedir. Lif oranının artmasıyla birlikte liflerin beton matrisinde homojen bir şekilde dağılmamasının, dayanım üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini belirtilmiştir (Sivakumar ve Santhanam, 2007). Dolayısıyla, optimum lif oranının belirlenmesi, karışımın performansını maksimize etmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Mikro lif konsantrasyonunun araştırıldığı hibrit lifli numunelere uygulanan 28 günlük dolaylı çekme deney sonuçları Şekil 6.5' te verilmiştir.

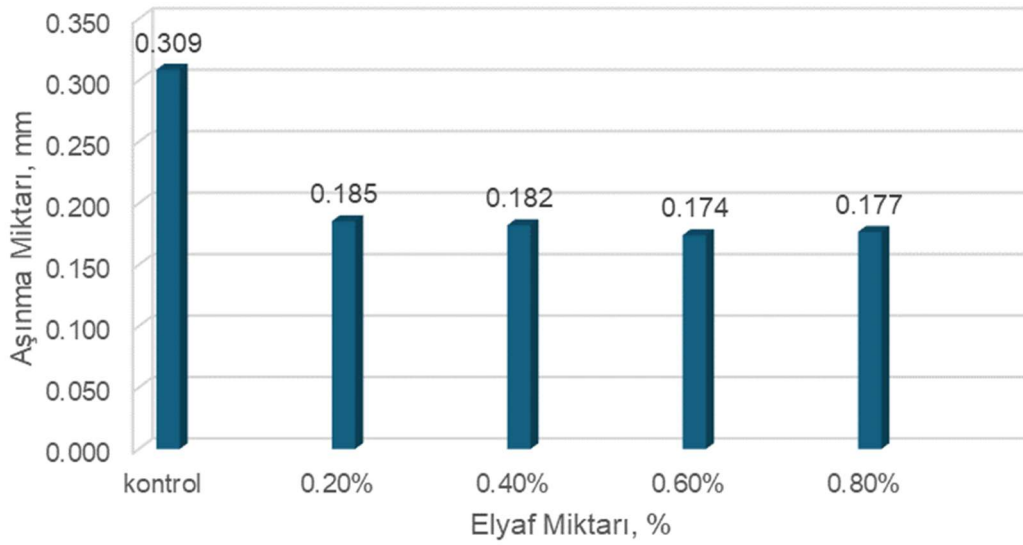


Şekil 6.5: Hibrit lifli numunelere ait 28 günlük dolaylı çekme dayanım grafiği

Hibrit lif içeren numunelerin 28 günlük dolaylı çekme dayanımı test sonuçları incelendiğinde, H1, H2 ve H3 numunelerinde %0,06 makro lif içeren numunelerle karşılaştırıldığında sırasıyla %2,6, %5,10 ve %12,30 oranında artış kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, mikro liflerin beton numunelerinin dolaylı çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Hibrit numunelerde kullanılan mikro liflerin oluşan erken çatlakların büyümesini geciktirerek çatlak oluşumunun önlenmesinde önemli olan çekme dayanım değerlerini iyileştirdiği görülmektedir.

6.4. Rotating-Cutter Aşınma Dayanımı Deneyi

Rotating-Cutter aşınma dayanımı deney sonuçları Şekil 6.6'da verilmiştir. Bu grafik, farklı oranlarda makro lif içeren beton numunelerinin 28 günlük Rotating-Cutter aşınma dayanımı değerleri göstermektedir. Her bir lif oranı için üç adet numune üzerinde yapılan deneyler sonucunda, aşındırılan yüzeyin farklı noktalarından kumpas yardımı ile ölçümler alınarak aşındırma derinliklerinin ortalaması belirlenmiştir. ASTM C944-99 standartlarına uygun olarak yapılan bu deney ile, beton numunelerinin aşınma dayanımını analiz edilmiştir.

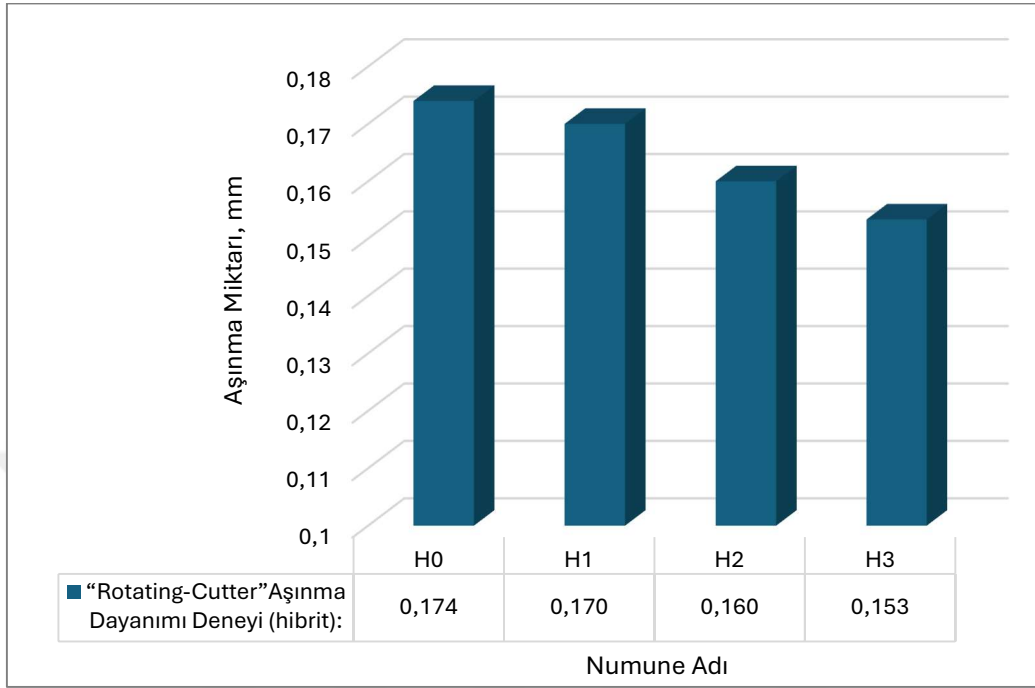


Şekil 6.6: 28 günlük numunelere ait Rotating-Cutter aşınma deney sonuçları

Şekil 6.6'da makro lif miktarının artmasıyla birlikte beton numunelerinin aşındırma derinliklerinde azalma görülmektedir. Bu bulgular, makro liflerin beton karışımlarında mekanik dayanıklılığı artırmak amacıyla etkili bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Hibrit liflerin kullanılmasıyla hazırlanan yeni numunelere uygulanan 28 günlük Rotating-Cutter aşınma dayanımı deney sonuçları Şekil 6.7'de verilmiştir. Hibrit liflerin kullanıldığı numuneler (H1, H2 ve H3) üzerinde gerçekleştirilen 28 günlük testlerinin sonuçları, bu numunelerin aşınma derinliklerinde sırasıyla 0,170 mm, 0,160 mm ve 0,153 mm'lik değerler göstermiştir. Bu veriler, %0,60 makro lif içeren numunelerle karşılaştırıldığında, H1 numunesinin aşınma derinliği %2,30, H2 numunesinin %8,05 ve H3 numunesinin %12,07 oranında bir düşüş sergilediği görülmektedir. Bu sonuçlar, yalnızca optimum makro lif

içeren numunelerin aşınma derinliği olan 0,174 mm ile karşılaştırıldığında, hibrit lif kullanımının aşınmaya karşı direnci artırmada etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

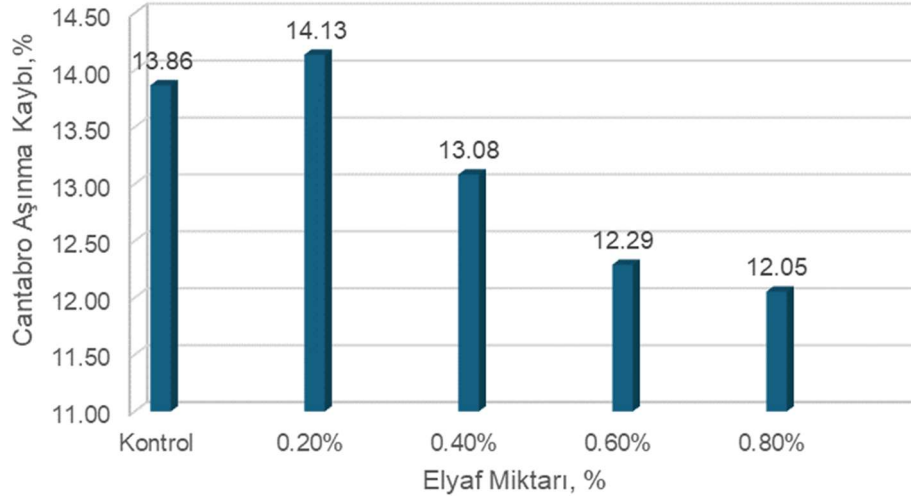


Şekil 6.7: Hibrit lif numunelere ait 28 günlük Rotating-Cutter aşınma dayanımı deney sonuçları

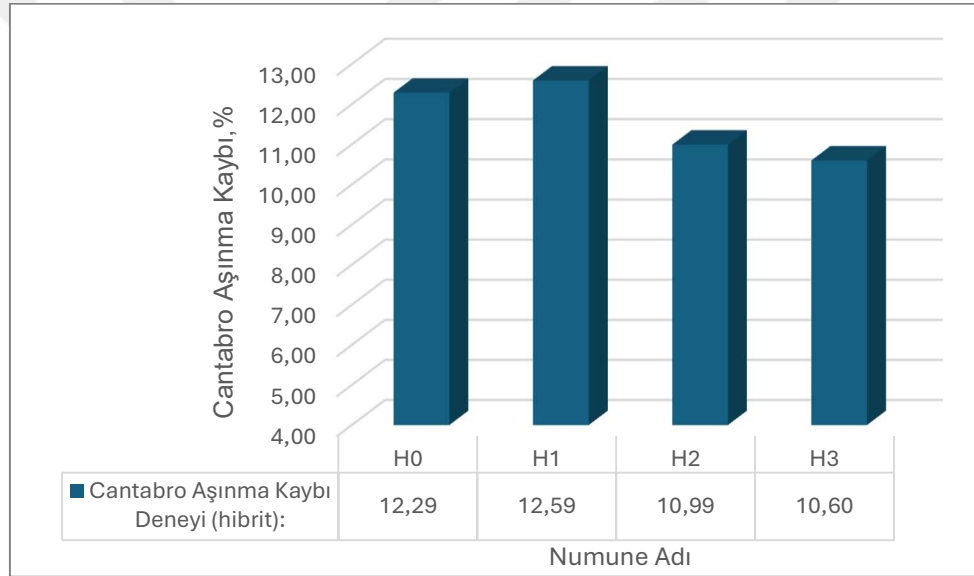
6.5. Cantabro Aşınma Kaybı Deneyi

Cantabro aşınma kaybı deney sonuçları Şekil 6.8’de verilmiştir. Yapılan deneylere göre, Cantabro aşınma deneyi ve benzer şekilde dolaylı çekme dayanım deneyi sonuçlarına göre, %0,20 lif ilavesinin aşınma dayanımında bir düşüşe neden olduğunu, ancak bu düşüşten sonra lif ilave oranı arttıkça aşınma dayanımının arttığını göstermektedir. Ayrıca, %0,6 ve %0,80 lif ilave oranlarının aşınma değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Hibrit lifli numunelere 28 günlük kür süresinden sonra uygulanan Cantabro aşınma kaybı deney sonuçları Şekil 6.9’da verilmiştir.

Cantabro aşınma dayanımı test sonuçlarına göre H2 ve H3 numuneleri, sadece makro lif içeren numuneye göre daha düşük aşınma miktarına sahiptir. %0,05 mikro lif içeren H1 numunesinde ise küçük bir artış gözlenmiştir. Sonuç olarak, mikro liflerin takviyesinin SSB karışımların yüzey aşınma direncini artırarak genel olarak olumlu bir etki göstermektedir.



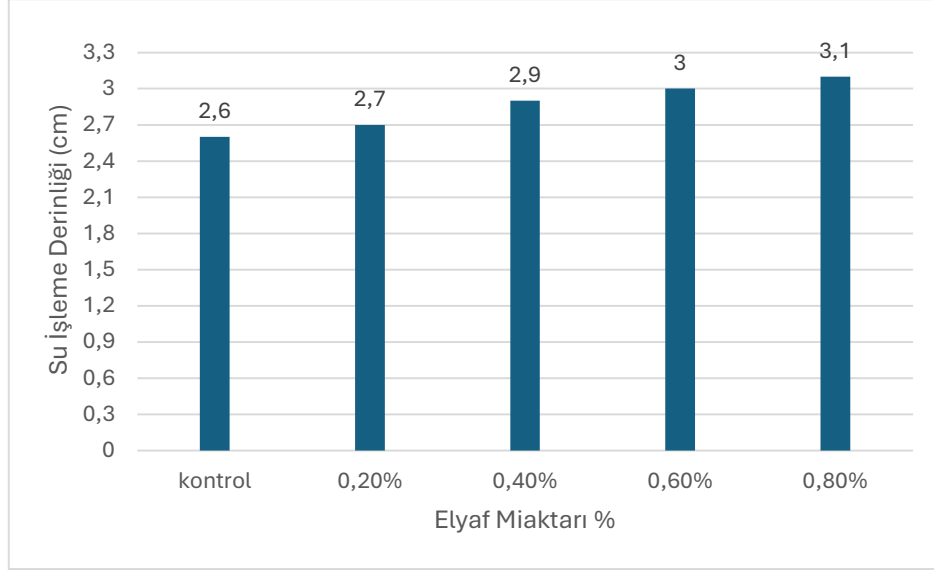
Şekil 6.8: Sentetik makro lif konsantrasyonu ile Cantabro aşınma kaybı değişim grafiği



Şekil 6.9: Hibrit lifli numunelere ait 28 günlük Cantabro aşınma dayanımı sonuçları

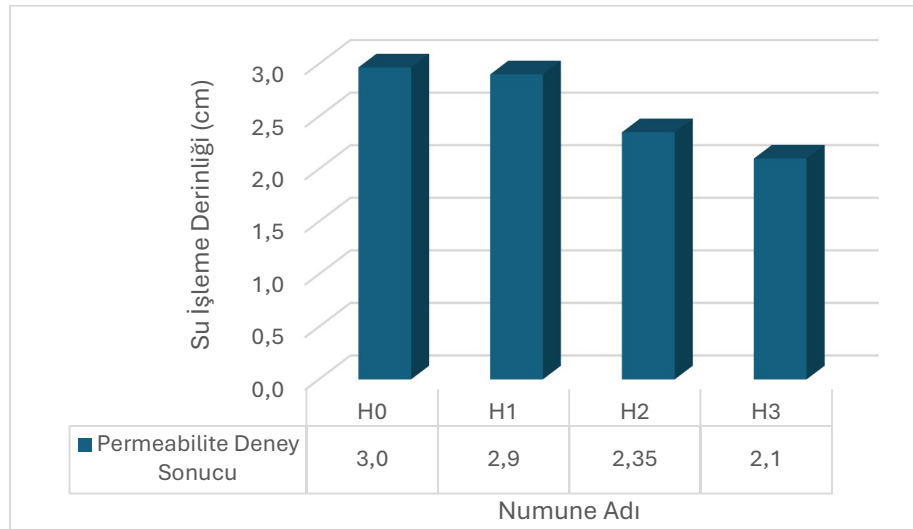
6.5. Permeabilite Deney Sonuçları

Makro lif konsantrasyonunun 28 günlük SSB numunelerinin basınçlı su hidrolik geçirimsizlik deney sonuçları Şekil 6.10'da verilmiştir. Her bir lif oranı için üç adet numune üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen su işleme derinliklerinin ortalaması alınarak geçirgenlik değerleri belirlenmiştir. TS EN 12390-8 standartlarına uygun olarak yapılan bu deney, SSB karışım numunelerinin su geçirgenliği açısından performansını ortaya koymaktadır. Bu standarda uygun olarak yapılan testler, betonun uzun vadeli dayanıklılığı ve performansı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 6.10: Sentetik makro lif konsantrasyonu ile SSB numunelerin hidrolik geçirgenlik değişimi

Deney neticesinde çıkan sonuçlara göre, makro lif miktarındaki artışla birlikte beton numunelerinin su geçirgenlik değerlerinde de bir artış gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlar, betonun içerdiği lif miktarının geçirgenlik üzerinde gözlenebilir bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Lif miktarının artması, betonun mikroyapısında kılcal boşlukların oluşumuna neden olarak su geçirgenliğini artırmaktadır. Bu durum, betonun dayanıklılığı ve servis ömrü açısından önemli bir faktör olup, lif oranının optimum seviyede belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Hibrit liflerin kullanılmasıyla hazırlanan SSB karışım numunelere uygulanan 28 günlük permeabilite deney sonuçları Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11: Hibrit lifli numunelere ait permeabilite deney sonuçları

Hibrit liflerin kullanıldığı numuneler (H1, H2 ve H3) üzerinde 28 günlük kür sürelerinin sonunda yapılan permeabilite testleri sonucunda, su işleme derinliklerinde sırasıyla %3,40, %21,7 ve %30 oranlarında bir azalma kaydetmiştir. Bu azalma, sadece optimum makro lif içeren numunelerle kıyaslandığında belirgin hale gelmiştir. Elde edilen bu veriler, mikro liflerin numunelerin su geçirmezlik performansı üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Numunelerdeki mikro liflerin varlığı, su işleme derinliğinin azalmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuş ve bu durum, su geçirme direncini artırıcı bir faktör olarak değerlendirilebilir. Özellikle H2 ve H3 numunelerinde gözlemlenen %21,70 ve %30'luk su geçirgenlik azalması, mikro liflerin etkili bir çatlak bariyeri görevi görmesiyle açıklanabilir. Mikro lifler, suyun kılcal hareketini sınırlandırarak, betonda daha sıkı bir yapı oluşturur. Dias (2000) de mikro liflerin betondaki geçirgenliği önemli ölçüde azalttığını ve bunun betonun servis ömrü üzerinde olumlu etkiler yarattığını bildirmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sentetik makro ve mikro liflerin hibrit kullanımının SSB kaplama karışımların mekanik ve hidrolik geçirgenlik davranışına etkilerinin araştırıldığı bu deneysel çalışmadan elde edilen nihai sonuçlar ve öneriler aşağıda belirtilmektedir:

- Sentetik lif katkılı SSB karışımlarının incelendiği çalışmada, kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında, bu karışımların maksimum kuru birim ağırlık değerlerinde azalma gözlenmiştir. Ayrıca, lif ilavesinin SSB karışımlarının yüzey alanının artmasına bağlı olarak su gereksinimlerinin de arttığı belirlenmiştir. Lif içeriğindeki artışla, karışımın sıkıştırılabilirliği ve kompaktlığını azaltmıştır ve bu nedenle maksimum kuru birim ağırlığın azaldığı tespit edilmiştir. Sentetik lif ilavesi, SSB karışımlarının optimum su içeriğini artırdığını gözlemlenmiştir.
- Makro lif ilave oranlarının basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, 7 ve 28 günlük numunelerde benzer değişimler gözlemlenmiştir. Lif oranı %0,20'de iken basınç dayanımlarında hafif bir azalma, %0,4 ve %0,6 oranlarında ise artış tespit edilmiştir. Ancak, %0,80 lif oranında belirgin bir dayanım düşüşü meydana gelmiştir.
- Lif yüzdesi %0,60'yı aştığında, karışım sırasında liflerin birbirine yapışarak ayrılması zor topaklar oluşturduğu fark edilmiştir. Bu durum, liflerin karışımdaki olumlu etkisinin olumsuzla dönmesine neden olmaktadır. Numunelerde gözlemlenen boşluklar, basınç dayanımı test sonuçlarında bir düşüş olacağını işaret etmektedir. Bu bulgular, lif oranının belirli bir eşiği geçtikten sonra karışımın homojenliğini olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.
- Dolaylı çekme deney sonuçları, makro sentetik lif ilavesiyle basınç dayanımı deneylerine benzer bir eğilim sergilemiştir. En yüksek çekme dayanım değerleri %0,6 lif katkı oranında elde edilmiştir, ancak %0,80 lif ilavesinde dayanım değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. %0,20 makro lif konsantrasyonunun SSB matriksi içinde yeterli ağı oluşturamaması, lif oranının belli bir değerin altında kaldığında betonun iç yapısını zayıflattığı görülmektedir. Liflerin yetersiz destek sağlaması, karışımın hızla hasar görmesine ve lifsiz kontrol numunesine kıyasla daha düşük performans sergilemesine yol açmaktadır.

- Makro lif oranının artması, betonun aşındırma dayanımını olumlu yönde etkileyerek aşındırma derinliğini azaltmaktadır. Anlaşılan, tüm katkı oranlarında aşınma değerlerinin birbirine oldukça yakın ve kontrol numunesinden daha az olduğunu belirlenmiştir. Lif ilavesi, betonun yüzey aşındırıcı kuvvetlere karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlamakta ve böylece servis ömrünü uzatmaktadır.
- Cantabro aşınma deneyinde, %0,20 makro lif ilavesiyle aşınma oranının arttığı, ancak bu değerden sonra lif ilave oranı arttıkça aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. Gerilme testlerinde de görüldüğü üzere, belli bir değer altında kalan makro lif takviyesinde, karışım içerisinde homojen dağılım sağlanamaması ve zayıf lif -matris bağlanması nedeniyle numunelerin aşınma direnci de kısmen azalmaktadır. %0,40 - %0,60 oranlarında aşınma direncinin iyileşmesi, lif oranı arttıkça homojenlik artması ve lif-matris arayüzeyi güçlenmesi ile açıklanabilir. Lif ilave oranının belirli bir seviyede optimal aşınma direnci sağladığı gözlemlenmiştir.
- Farklı oranlarda makro lif içeren beton numunelerinin 28 günlük permeabilite deney sonuçlarına göre, lif miktarının artması su geçirgenliğini artırmaktadır. Bu artış, SSB'nin mikroyapısında lif ve matriks yüzeylerindeki aderansın zayıf olduğuna ve kılcal gözenek oluşumuna işaret etmektedir.
- Mekanik ve aşındırma deneylerinin sonuçları, makro sentetik lif için optimum katkı miktarının %0,60 olduğunu ortaya koymuştur. Bu oranın üzerindeki makro sentetik lif kullanımı, SSB karışım matrisinde süreksizliklere yol açmaktadır.
- SSB kaplama karışımlarında 60 mm uzunluğundaki makro sentetik liflerin kullanımı, erken dönemde oluşan çekme çatlaklarını ve aşınmaları azaltarak kaplamanın hizmet kalitesini ve ömrünü artırabilir.
- Hibrit liflerin kullanıldığı numuneler, 28 günlük tek eksenli basınç dayanımı test sonuçlarında, sadece optimum makro lif içeren kontrol numunelerine kıyasla bir düşüş göstermiştir. Bu veriler, mikro lif kullanımının numunelerin basınç dayanımını olumsuz yönde etkilediğini işaret etmektedir.
- Hibrit lif içeren numunelerin 28 günlük dolaylı çekme dayanımında, H1, H2 ve H3 numunelerinde sırasıyla %2,60, %5,10 ve %12,30 artış kaydedilmiştir. Bu artışlar, optimum makro lif içeren kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında belirgindir ve mikro liflerin eklemesi ile mikro çatlakların yayılması engelleyerek çekme dayanımını artırdığı görülmektedir.

- Hibrit lif içeren numuneler (H1, H2 ve H3), 28 günlük hidrolik geçirgenlik testlerinde su işleme derinliklerinde sırasıyla %3,40, %21,70 ve %30 azalma göstermiştir. Bu bulgular, mikro liflerin su geçirmezlik performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.
- Her iki aşındırma test sonuçları da, hibrit lif takviyesinin aşınma direncini artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Hibrit lif içeren numuneler, %0,60 makro lif içeren numunelere (kontrol numuneleri) kıyasla daha düşük aşınma miktarına sahiptir.
- Bu hibrit lifli karışımlardan numuneleri üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda, mikro lif eklemesinin hem olumlu hem de olumsuz yönleri dikkatle alınarak ideal mikro polipropilen lif oranı %0,10 olarak belirlenmiştir.
- Karışımın mekanik özelliklerinin istenilen düzeyde olabilmesi için liflerin uygun şekilde dağılımı kritik bir öneme sahiptir. Liflerin düşük oranlarda eklenmesi durumunda bazen performans düşüşü gözlemlenebilmektedir. Bu performans düşüşlerinin önüne geçmek amacıyla, liflerin karışım içerisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için optimum lif oranların belirlenmesinin önemi ortaya çıkmaktadır.
- Çalışmada kullanılan liflerin performans sınırlarını göz önünde bulundurarak, daha dayanıklı ve yüksek performanslı liflerin (çelik lif gibi) değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bu tür liflerin karışımlara eklenmesi, istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesini ve performans düşüşlerinin minimize edilmesini sağlayabilir.
- Gelecekteki araştırmalarda, lifle güçlendirilmiş silindire sıkıştırılmış betonun mekanik performans üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla eğilme testlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Eğilme testleri, lif katkılı kompozit malzemelerin yapısal dayanım ve performansını anlamak için etkili bir yöntemdir. Özellikle kancalı çelik liflerin, eğilme direncini önemli ölçüde artırması beklenmektedir. Bu nedenle, yüksek performanslı liflerin katkısı ile elde edilen kompozitlerin eğilme dayanımlarının sistematik bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, lif takviyeli malzemelerin optimize edilmesi ve daha dayanıklı yapıların tasarlanması için değerli bilgiler sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State and Highway Officials., Washington, DC.
- AASHTO (2015). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*. American Association of State and Highway Officials. Washington, DC
- Adaska, W. (2008). Roller-compacted concrete design and construction. *Professor's Seminar, American Concrete Pavement Association (ACPA)*, June 19, Skokie, Illinois.
- Algın, Z., Mermerdaş, K. ve Zeynepi, M. S. (2019). Silindirle sıkıştırılmış betonda makro sentetik elyaf kullanımının optimum içeriğine ve betonun dayanım özelliklerine etkisi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 992–1004. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.534055>
- Amer, N., Delatte, N. ve Storey, C. (2003). Using gyratory compaction to investigate density and mechanical properties of roller-compacted concrete. *Transportation Research Record*, 1834 (1): 77–84. <https://doi.org/10.3141/1834-10>
- Amer, N., Storey, C. ve Delatte, N. (2004). Roller-compacted concrete mix design procedure with gyratory compactor. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1893 (1): 46–52. <https://doi.org/10.3141/1893-06>
- American Concrete Institute (ACI) Committee 207 (1999). *Roller-Compacted Mass Concrete*. ACI Technical Committee Document 207.5R-99, Farmington Hills, MI.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 325 (2001). *Roller-Compacted Concrete Pavements*, ACI Technical Committee Document 325.10R-95, Farmington Hills, MI.
- Arabyarmohammadi, H., Sharbatdar, M.K. ve Naderpour, H. (2023). Experimental investigating the effect of non-steel fibers on the consistency and mechanical properties and toughness of RCCP. *Civil Infrastructure Researches*, 9 (2): 17-33. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.8714.1435>
- Arisoy B., (2005). Lifli betonların optimum karışım tasarımı. *Deprem Sempozyumu*, 23-25 Mart 2005, Kocaeli, 912-916.
- Balaguru, P.N. ve Surendra, P.S. (1992). *Fiber Reinforced Cement Composites*. McGraw-Hill, 1st. Edition, New York.
- Benouadah, A., Beddar, M. ve Meddah, A. (2017). Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9 (2): 623. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i2.1>

- Bentur, A. ve Mindess, S. (2007). *Fiber reinforced cementitious composites*. CRC Press.
- Berechman, J. (2003). Transportation—economic aspects of Roman highway development: the case of Via Appia. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37 (5): 453-478. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00056-3)
- Betterman, L.R., Ouyang, C. ve Shah, S.P. (1995). Fiber-Matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. *Advanced Cement Based Materials*, 2 (2): 53 – 61. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90025-X](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90025-X)
- Bolat, H., Şimşek, O., Çullu, M., Durmuş, G. ve Can, Ö. (2014). The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Composites Part B: Engineering*, 61: 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.043>
- Consoli, N.C., Montardo, J.P., Prietto, P.D.M. ve Pasa, G.S. (2009). Engineering behavior of a fiber-reinforced cemented soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (10): 1732-1738. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.043>
- Dias, W.P.S. (2000). Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation. *Cement and Concrete Research*, 30 (8): 1255-1261. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00311-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00311-2) [Get rights and content](#)
- Ekincioglu, Ö. (2003). Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı – Bir Optimum Tasarım. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 118.
- Gáspár, L. ve Bencze, Z. (2020). Roller compacted cement concrete (RCC) pavement. *Dorogi İ Mosti*, 2020 (21): 120–129. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti.2020.21.120>
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W. S. ve Hazaree, C. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements. *National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University*.
- Harrington, D., Ayers, M., Cackler, T., Fick, G., Schwartz, D., Smith, K., Snyder, M.B. ve Van Dam, T. (2018). Guide For Concrete Pavement Distress Assessments and Solutions: Identification, Causes, Prevention, And Repair. *National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University*.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed., Pearson Prentice Hall.
- Jahanbakhsh, P., Saberi F., Soltaninejad, M. ve Hashemi, S.H. (2023). Laboratory investigation of modified roller compacted concrete pavement (RCCP) containing macro synthetic fibers. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16:745–759. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00161-2>

- Johnston C.D. (2001). *Fiber Reinforced Cements and Composites*, 3rd ed, Gordon and Breach Science.
- Kessal, O., Achour, Y., Noui, A., Belkadi, A.A., Benouadah, A., Belagraa, L., Maafi N. ve Benammar, A. (2023). Bio-fiber reinforced roller compacted concrete designed for road construction: feasibility of date palm fibers in pavements. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27 (3): 1224-1246. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2077838>
- Kim, N.W., Saeki, N. ve Horiguchi, T. (1999). Crack and Strength Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Early Ages, *Transactions of the Japan Concrete Institute*.
- Kim, Y.S. (2007). Roller-compacted concrete shoulder construction on interstate highway in Georgia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2040 (1): 71-79. <https://doi.org/10.3141/2040-08>
- Kützing, L. (1997). Use of fiber cocktails to increase ductility of high performance concrete. *Annual Civil Eng. Report (LACER)*, Leipzig, 125–133.
- Liang, N., You, X., Yan, R. et al. (2022). Experimental investigation on the mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced roller compacted concrete pavements. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16 (3): 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00493-6>
- Mohod V. Milind ve Kadam N.K. (2016). A comparative study on rigid and flexible pavement: A review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13 (3): 84-88. <https://doi.org/10.9790/1684-1303078488>
- Otti, V. I., Nwolon, C., ve Ezechukwu, M.D.K. (2016). Rigid pavement as an alternative to flexible pavement failure in ogbaru swampy area. *Civil and Environmental Research*, 8 (3): 98-104.
- Pigeon, M. ve Marchand, J. (1993). The Frost Durability of Dry Concrete Products. Research (Report No. GCS-93-06). *Department of Civil Engineering, Laval University*. Quebec, Canada.
- Piggott, R.W. (1999). Roller Compacted Concrete Pavements-A Study of Long Term Performance (Publication No. RP366). *Portland Cement Association*. Skokie, IL.
- Pittman, D.W. ve Ragan, S.A. (1998). Drying shrinkage of Roller-Compacted concrete for pavement applications. *ACI Materials Journal*, 95(1). <https://doi.org/10.14359/348>
- Pittman, D.W. ve Anderton, G.L. (2009). The use of roller-compacted concrete pavements in the United States. *Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIRE PAV 6)*, July 8-10, Turin, Italy.

- Qian, C. ve Stroven, P. (2000). Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 30: 63–69.
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y. ve Kennedy, T.W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction* (2nd ed.). National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Scheving, A.G. (2011). Life Cycle Cost Analysis of Asphalt and Concrete Pavements. MS Thesis, School of Science and Engineering, Reykjavík University, Iceland, 83 s.
- Schrader, E.K. 1992. Roller-compacted concrete for dams—State of the art. *International Conference on Advances in Concrete Technology*, May 11-12, Athens, Greece.
- Sertkaya, B., Erdoğan, H., Özalp, F. ve Akçay, B. (2018). Çelik ve yüksek yoğunluklu polietilen makro lif takviyeli betonların kırılma davranışları. *Hazır Beton Dergisi*, 146:75-79.
- Sharbatdar, M.K. ve Rahmati F. (2022). Experimental evaluation of multi-functional effects of fibers on mechanical and performance properties of Roller-compacted concrete pavements (RCCP). *Construction and Building Materials*, 316: 125890. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125890>
- Sivakumar, A. ve Santhanam, M. (2007). Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*, 29 (8): 603-608. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.006>
- Sobhan, K. ve Mashnad, M. (2001). Roller-compacted fiber concrete pavement foundation with recycled aggregate and waste plastics. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1775 (1): 53-63. <https://doi.org/10.3141/1775-08>
- Soedirdjo, T.L., Hendarto, S. ve Triadi, A. (2003). Evaluation of traffic noise in arterial road with different road roughness. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 4: 1376-1389.
- Soroushian, P. ve Bayasi, Z. (1991). Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 88 (2): 129-134.
- Sukontasukkul, P., Chaisakulkiet, U., Jamsawang, P., Horpibulsuk, S., Jaturapitakkul, C. ve Chindaprasirt, P. (2019). Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand. *Case Studies in Construction Materials*, 11: 1-11,. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00271>
- Szostak, R. (1991). *Role of Transportation in the Industrial Revolution: A Comparison of England and France*. Quebec: McGill-Queen's Press-MQUP.

- Şengül, C. (2005). Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışına Su/İnce Malzeme Oranı ile Lif Dayanımının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 80 s.
- Taşdemir M.A. ve Kocatürk, A.N. (2005). Özel prefabrike elemanların ultra yüksek performanslı betonlarla üretimi. 6. *Ulusal Beton Kongresi*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 16-18 Kasım 2005, İstanbul, 447-457.
- Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, 1 (2): 125-144.
- Tayabji, S.D. ve Okamoto, P.A. (1987). Engineering properties of roller-compacted concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1136: 33-45.
- Wimsatt, A.J., Chang-Albitres, C.M., Krugler, P.E., Scullion, T., Freeman, T.J. ve Valdovinos, M.B. (2009). Considerations For Rigid vs. Flexible Pavement Designs When Allowed As Alternate Bids: Technical Report (No. FHWA/TX-09/0-6085-1). *Texas Transportation Institute*.
- Yao, W., Li, J. ve Wu, K. (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*, 33 (1): 27-30. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00913-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00913-4)
- Yazdani, G. (2018). Effect of Nanopolymer Modified Binder on Hot Mix Asphalt. Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, University of North Dakota, North Dakota, 50 s.
- Yoder, E. J. ve Witczak, M.W. (1975). *Principles of Pavement Design* (2nd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Yoo, D.Y. ve Banthia, N. (2017). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 73: 267-280. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>
- Yousefi, A. ve Golchin, B. (2020). Investigation of fracture resistance of roller-compacted concrete pavement modified with synthetic fibers. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52 (5): 273-276. <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15194.5850>
- Zhang, L., Cao, P., Li, Z. ve Chen, Y. (2020). The effect of macro synthetic fibers on the properties of stabilized soil mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (4): 04020023.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :

Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller :

Bilimsel Faaliyet/Yayınlar :

Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar :

Projeler ve Kurs Belgeleri :

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi :

Tarih :